

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



EFEECTO EN EL AGUA SUBTERRANEA CIRCUNDANTE A UN RELENO
SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACION ARTIFICIAL, PARA LA
DEPOSICION FINAL DEL LODO PROVENIENTE DE UNA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

Por

ADAN ADRIAN PLASCENCIA INZUNZA

COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL

AGOSTO DEL 2009

ERRECTOR EN EL AGUA SUBTERRANEA CIRCUNDANTE A UN RELENO
SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACION ARTIFICIAL, PARA LA
DISPOSICION FINAL DEL LODO PROVENIENTE DE UNA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

A.A.P.I.

T
TD767
P5
2009
c.1

2009



1090020148

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



T
TD767
P5
2009
C-1

EFFECTO EN EL AGUA SUBTERRANEA CIRCUNDANTE A UN RELENO
SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACION ARTIFICIAL, PARA LA
DISPOSICION FINAL DEL LODO PROVENIENTE DE UNA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

Por

ADAN ADRIAN PLASCENCIA INZUNZA

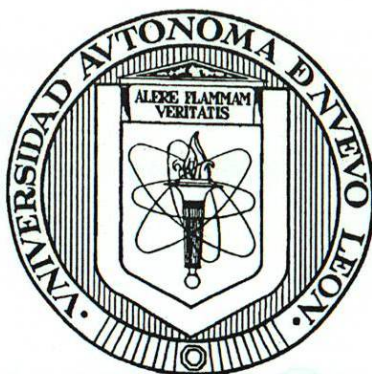
COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL

AGOSTO DEL 2009

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL U.A.N.L.
BIBLIOTECA POSGRADO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EFFECTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA CIRCUNDANTE A UN
RELENO SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN ARTIFICIAL, PARA
LA DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO PROVENIENTE DE UNA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL**

Por

ADAN ADRIAN PLASCENCIA INZUNZA

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS con Especialidad en
Ingeniería Ambiental**

Agosto, 2009.

EFFECTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA CIRCUNDANTE A UN RELLENO SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN ARTIFICIAL, PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO PROVENIENTE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

San Nicolás de los Garza, N.L. a 27 de abril de 2012

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ

Aprobación de Tesis:
de la Facultad de Ingeniería Civil
Presente.-

En atención a su oficio, en el que me informa que ha sido designado como Evaluador de la tesis:

Alejandro García García

M.C. Alejandro García García
Director de Tesis

RELLENO SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN ARTIFICIAL PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO PROVENIENTE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL, que presenta el Ing. Adán A. Plasencia Irujo, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental, comunico a Usted que he leído y evaluado la calidad de dicha tesis, considerándola como APROBADA.

Alfredo N. Cantú

Sin otro particular por el presente se expide la presente Ordenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

M.C. Alfredo Núñez Cantú
Evaluador de Tesis

Atentamente,-

Benjamín Limón Rodríguez

DR. BENJAMÍN LIMÓN RODRÍGUEZ
Jefe del Depto. de Ingeniería
Dr. Benjamín Limón Rodríguez
Evaluador de Tesis

RECTORADO DE INGENIERÍA CIVIL UANL
BIBLIOTECA DE POSTGRADO



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

San Nicolás de los Garza, N.L. a 27 de abril de 2009

Dr. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ
Subdirector de Estudios de Postgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ
Subdirector de Estudios de Postgrado e Investigación
de la Facultad de Ingeniería Civil
Presente.-

En atención a su oficio, en el que me informa que he sido designado como Evaluador de la tesis "EFECTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA CIRCUNDANTE A UN RELLENO SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN ARTIFICIAL, PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO PROVENIENTE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL", que presenta el Ing. Adán A. Plascencia Inzunza, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental, comunico a Usted que he leído y evaluado la calidad de dicha tesis, considerándola como **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

Atentamente.-

DR. BENJAMÍN LIMÓN RODRÍGUEZ
Jefe del Depto. de Ingeniería Ambiental



FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL U.A.N.L.
BIBLIOTECA POSGRADO

San Nicolás de los Garza, N. L. a 18 de mayo de 2009.

DEDICATORIA

Dr. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ

Subdirector de Estudios de Postgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Autónoma de Nuevo León.
Presente.-

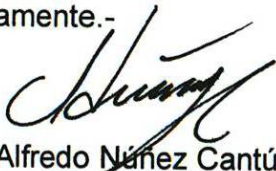
A Dios

En atención a su oficio, en el que me informa que he sido designado como Evaluador de la tesis "EFECTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA CIRCUNDANTE A UN RELLENO SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN ARTIFICIAL, PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO PROVENIENTE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL", que presenta el **Ing. Adán A. Plascencia Inzunza**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental, comunico a Usted que he leído y evaluado la calidad de dicha tesis, considerándola como **APROBADA**.

A mis hijos

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

Atentamente.-



M.C. Alfredo Núñez Cantú.

AGRADECIMIENTOS

DEDICATORIA

Me agradecimiento al M.C Alejandro García García, al Dr. Benjamín Limón Rodríguez y al M.C Alfredo Méndez Cantú, por su apoyo para la realización de este trabajo.

Al Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por las facilidades y

A Dios brindadas para la realización de este trabajo.

A todo el personal del Departamento de Ingeniería Ambiental por su apoyo en todo momento.

A mi esposa

A todos mis maestros y amigos de generación.

Finalmente, a todos aquellos que de alguna u otra forma contribuyeron a la **A mis hijos** de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento al M.C Alejandro García García, al Dr. Benjamín Limón Rodríguez y al M.C Alfredo Núñez Cantú, por su apoyo para la realización de este trabajo.

Al Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por las facilidades y orientación brindadas para la realización de este trabajo.

A todo el personal del Departamento de Ingeniería Ambiental por su apoyo en todo momento.

A todos mis maestros y amigos de generación.

Finalmente, a todos aquellos que de alguna u otra forma contribuyeron a la realización de este trabajo.

RESUMEN

Título:

EFFECTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA CIRCUNDANTE A UN RELENO SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN ARTIFICIAL, PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO PROVENIENTE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL.

Resumen:

En el capítulo 1, se mencionan las generalidades acerca del agua subterránea, se describen los mecanismos denominados "capacidad de campo" y "punto permanente de marchitez" del suelo. De igual forma, se presenta una descripción general respecto al movimiento del agua subterránea (ley de Darcy) y la ecuación correspondiente. Posteriormente, se mencionan las posibles fuentes de contaminación del agua subterránea y se menciona la información general del lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual industrial.

En el capítulo 2, se describen el objetivo general, los objetivos particulares y la hipótesis.

En el capítulo 3, se determina experimentalmente y se estima de manera teórica la posible afectación al acuífero derivada de la disposición final del lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual industrial en un relleno sin un sistema de impermeabilización artificial.

En el capítulo 4, se exponen los resultados de la determinación experimental y de la estimación teórica.

Finalmente, en el capítulo 5, se expone la conclusión, misma que es sustentada en los resultados de la determinación experimental y la estimación teórica.

3.	MÉTODOS	TABLA DE CONTENIDO	29
3.1	Determinación experimental de la posible		
	afectación al acuífero		30
3.1.1	Muestreo		30
3.1.2	Análisis de las muestras		31
3.1.3	Interpretación de los resultados		32
1.	ANTECEDENTES		1
1.1	El agua subterránea	de la posible afectación al acuífero	1
1.2	El agua del suelo	de la generación de lixiviado	6
1.3	El agua subterránea en movimiento (ley de Darcy)		11
1.4	La contaminación del agua subterránea	lixiviado	16
1.5	Geología en la zona de estudio		20
	1.5.1	Geología regional	20
	1.5.2	Geología local	21
1.6	Generación y composición del lodo	perimemal	22
		de la posible afectación al acuífero	55
2.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS	ración teórica de la posible	27
2.1	Objetivo general	acuífero	27
	2.1.1	Objetivos particulares	27
2.2	Hipótesis		28
6.	BIBLIOGRAFÍA		56

3.	MÉTODOS	29
3.1	Determinación experimental de la posible afectación al acuífero	30
3.1.1	Muestreo	30
3.1.2	Análisis de las muestras	31
3.1.3	Comparación de los resultados	32
3.2	Estimación teórica de la posible afectación al acuífero	33
3.2.1	Estimación de la generación de lixiviado	33
3.2.2	Estimación de la cantidad de lixiviado	44
3.2.3	Estimación del tiempo en que el lixiviado alcanza el acuífero	45
4.	RESULTADOS	55
4.1	Resultados de la determinación experimental de la posible afectación al acuífero	55
4.2	Resultados de la estimación teórica de la posible Afectación al acuífero	56
5.	CONCLUSIONES	57
6.	BIBLIOGRAFÍA	58

LISTA DE TABLAS

APÉNDICES	61
Tabla APÉNDICE A.- Análisis CRETÍ del lodo en el sitio del relleno	Pág. 61
APÉNDICE B.- Método de muestreo de pozos	68
APÉNDICE C.- Resultados del muestreo de pozos	72
APÉNDICE D.- Estimación de la evaporación en el sitio del relleno	77
3. Evaporación en el sitio del relleno	36
4. Escurrimiento en el sitio del relleno	38
5. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente	37
6. Balance de agua en la capa de lodo de la celda (100% de evaporación)	42
7. Balance de agua en la capa de lodo de la celda (35% de evaporación)	43
8. Parámetros hidráulicos de la lutita intemperizada y la lutita gris	49
9. Resultados de la determinación analítica de los parámetros seleccionados para su análisis	55

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Información del lodo	25
2. Precipitación en el sitio del relleno	34
3. Evaporación en el sitio del relleno	35
4. Escurrimiento en el sitio del relleno	36
5. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente	37
6. Balance de agua en la capa de lodo de la celda (100% de evaporación)	42
7. Balance de agua en la capa de lodo de la celda (35% de evaporación)	43
8. Parámetros hidráulicos de la lutita intemperizada y la lutita gris	49
9. Resultados de la determinación analítica de los parámetros seleccionados para su análisis	55

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

Figura		Página
1.1	1. Esquema para explicar la ley de Darcy	12
	2. Celda del relleno	26
	3. Localización de los pozos de monitoreo y la dirección del flujo del agua subterránea	30
	4. Balance de agua en una capa de suelo	40
	5. Celda del relleno con la lamina de lixiviado en el fondo	44
	6. Ilustración de la celda, la capa de lutita y el acuífero	48

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 El agua subterránea.

Cada año caen, aproximadamente, 110 billones de metros cúbicos de agua, en forma de precipitaciones pluviales, sobre el globo terráqueo. La población del planeta se estima en 5,700 millones de habitantes, lo que significa que cada uno recibe, en promedio, cerca de 53,000 litros de agua dulce por día, y esto sin considerar el agua que cae en forma de lluvia o nieve en los océanos. Ciertamente, el agua debería alcanzar para todos (Price Michael, 2007).

Sin embargo, a pesar de la aparente abundancia de agua, a diario mueren miles de personas por enfermedades asociadas con esquemas inadecuados de abastecimiento de agua limpia. Por supuesto, el problema no es la cantidad de agua, ni el número de personas, sino la distribución relativa de ambos, así como el hecho de que el agua no llega regularmente distribuida en el tiempo.

Una solución que la humanidad ha aplicado para resolver estos problemas ha sido construir sus asentamientos cerca de fuentes confiables de agua, donde exista una característica natural que corrija de algún modo la distribución irregular de la lluvia. Quizá un lago que la almacene o un río que conduzca el agua desde una región donde haya más precipitaciones, o donde éstas sean regulares.

Por supuesto, existen áreas en el mundo donde, por razones climáticas o geológicas, no existen corrientes permanentes ni ríos; sin embargo, muchas de ellas han estado habitadas durante miles de años. Los habitantes de los primeros asentamientos dependían para su abasto del agua que se encuentra en el subsuelo, a menudo a pocos metros de la superficie, la cual explotaban cavando pozos.

En la actualidad, en países del mundo entero, mucha gente no sólo no está consciente de que gran parte del agua de abastecimiento se extrae del subsuelo, sino que tampoco sabe que el agua subterránea es un recurso de uso común y generalizado. Debido a que la mayoría de la gente da por sentado su abastecimiento de agua y de energía, difícilmente se detendrá a pensar de dónde proviene el agua, hasta el día en que ésta deje de llegar; “nadie echa de menos el agua hasta que se seca el pozo”. La falta de conciencia tal vez sea inevitable, ya que las fuentes de agua subterránea son invisibles y no pueden tener el mismo impacto sobre los sentidos que la inmensidad de un lago o el rugir de una catarata. Sin embargo, esto es lamentable, pues las fuentes subterráneas representan el almacenamiento de agua dulce más grande del planeta.

Así mismo, con frecuencia ofrecen la mejor solución – en algunos casos la única – para el problema del abastecimiento de agua potable y para riego.

Se estima que la cantidad total de agua sobre la tierra es un poco más de 1400 millones de kilómetros cúbicos. De este volumen, aproximadamente 1,370 millones de kilómetros cúbicos, es decir, cerca del 95%, es agua de mar. Gran parte del resto, un 2% del total, se encuentra en forma sólida en los glaciares y casquetes polares. Virtualmente, toda el agua restante – el agua que no es de mar y que no está congelada – es agua subterránea. El agua en los ríos y en los lagos, en la atmósfera y en la zona no saturada, comprende, en conjunto, sólo 1/50 del 1% del agua total susceptible como recurso para abastecimiento. Las estimaciones acerca del volumen de agua subterránea varían de 7 millones de kilómetros cúbicos, aproximadamente a unos 60 millones de kilómetros cúbicos. No toda esta agua puede utilizarse, pues, una parte está contenida en espacios porosos que son muy pequeños o en rocas que se encuentran a grandes profundidades, lo que limita su uso como recurso. De manera similar, parte de esta agua existe en un suelo permanentemente congelado, en altas latitudes, o es salada. El agua subterránea no está disponible de manera uniforme en los continentes (Price Michael, 2007).

En términos simples de cantidad, el agua subterránea es consecuentemente de gran importancia; pero la cantidad no lo es todo, y desde el punto de vista del abastecimiento, el agua subterránea tiene otras ventajas sobre el agua superficial. Un

depósito superficial generalmente debe ser embalsado en algún momento, en algún lugar, aún cuando su capacidad total no sea necesaria por varios años.

o de perforar y construir norias y pozos. La segunda desventaja, se refiere a que cuando el agua

El agua subterránea puede a menudo extraerse donde y cuando se necesite por medio de pozos que se perforan y se construyen en los lugares deseados. De ese modo, si la demanda de agua aumenta menos rápido de lo que se había anticipado, la autoridad responsable del abasto de agua no se queda con el pasivo oneroso en la forma de un lago hecho por el hombre y que nadie necesita.

Al contrario, de los depósitos de agua superficial que ocupan áreas amplias, frecuentemente de gran valor para la agricultura u otro uso, la presencia y utilización del agua subterránea no presenta conflictos por el uso del suelo bajo el cual se encuentra. Localizada en las profundidades debajo del suelo, no queda a la vista, está resguardada de los cambios de temperatura y protegida de la evaporación que en un verano caliente puede causar pérdidas sustanciales de agua en las presas y los lagos. Debido a la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea, es menos vulnerable a la contaminación, que el agua en la superficie.

Si el agua subterránea tiene tales ventajas – abundancia, disponibilidad en climas áridos y relativamente a salvo de la contaminación - uno podría preguntarse por qué. No obstante, las ventajas del agua subterránea, hay al menos dos graves desventajas: la primera de ellas la constituye el hecho de que no está distribuida uniformemente en

la corteza terrestre. Existen grandes áreas en el mundo en donde el agua subterránea no puede ser obtenida en cantidades suficientes para justificar el gasto de perforar y construir norias y pozos. La segunda desventaja, se refiere a que cuando el agua subterránea es alcanzada por algún contaminante es mucho más difícil, si no imposible, eliminar dicho contaminante.

El suelo es una compleja combinación de material orgánico e inorgánico, una continua matriz de vida y destrucción. Consiste principalmente en partículas minerales, materia orgánica en descomposición, oxígeno, agua y aire. Las partículas minerales se derivan de la desintegración de las rocas por efecto del conjunto de procesos conocidos como intemperismo; las partículas disgregadas pueden mantenerse en los alrededores de la roca que las origina o ser transportadas por el aire, el viento o el agua. En cualquier caso, los productos de la disgregación de esa roca constituyen la base de sustentación para los organismos vivos. Las bacterias son probablemente las primeras en aparecer, seguidas del musgo y los líquenes. A continuación son los hongos, las plantas y los animales y finalmente los humanos. Las plantas son transportadas por el viento o por la lluvia, con la que se inicia la formación de una cubierta vegetal. Las raíces de las plantas colaboran en la liberación de partículas minerales, mientras que la desintegración de la materia vegetal favorece la creación de una mayor cantidad de humus. Las hormigas de tierra

1.2 El agua del suelo.

La porción de la corteza terrestre denominada "suelo" comprende un espesor aproximado de un metro (Michael Price, 2007). El suelo es el plano de contacto con nuestro planeta; sobre él vivimos, y cuando las personas fallecen se convierten en parte del él. Las plantas crecen a sus expensas, además de que las plantas terrestres proveen, directa o indirectamente, la mayor parte del oxígeno y los nutrientes que consumimos.

El suelo es una complicada combinación de material orgánico e inorgánico, una curiosa mezcla de vida y destrucción. Consiste principalmente en partículas minerales, materia orgánica en descomposición, organismos vivos, agua y aire. Las partículas minerales se derivan de la desintegración de las rocas por efecto del conjunto de procesos conocido como intemperismo; las partículas disgregadas pueden mantenerse en los alrededores de la roca que las origina o ser transportadas por el aire, el hielo o el agua. En cualquier caso, los productos de la disgregación de esa roca suministran la base de sustentación para los organismos vivientes. Las bacterias son probablemente las primeras en arribar, seguidas del musgo y los líquenes. A medida que mueren y comienzan a desintegrarse, sus restos constituyen el humus. Las semillas son transportadas por el viento o por la actividad animal, con la que se inicia la formación de una cubierta vegetal. Las raíces de las plantas colaboran en la asociación de partículas minerales, mientras que la desintegración de la materia vegetal favorece la creación de una mayor cantidad de humus. Las lombrices de tierra

y los animales excavadores colaboran en la distribución del material orgánico en el suelo, además de que crean los conductos por donde el aire y el agua pueden circular en el suelo. La actividad respiratoria de los microorganismos incrementa el contenido de bióxido de carbono en la zona del suelo, por lo que existe una buena cantidad de este gas que permite que el agua de lluvia disuelva el carbonato de calcio y otros minerales (Michael Price, 2007).

En zonas con una pendiente ligera, el tipo de suelo que se forma depende en gran medida de factores como el clima y el tipo de roca que originan los minerales en el suelo. La propiedad fundamental que ocasiona que los fragmentos derivados de las rocas se transformen en suelos es la presencia de organismos vivos, los cuales requieren de agua.

En la mayoría de los casos, el agua se incorpora al suelo por la infiltración después de la lluvia; debido a fuerzas de atracción molecular y a tensión superficial, el agua forma una película que rodea el exterior de las partículas sólidas. El aire también está presente en los huecos del suelo. El espesor de la película de agua y, por tanto, la proporción entre el agua y el aire depende del grado de saturación del espacio poroso en el suelo o de lo que en ocasiones se denomina: “condiciones de humedad del suelo”. Estas condiciones son muy variables y dependen principalmente del clima.

Supongamos que se tiene un suelo que recientemente experimentó una fuerte y prolongada lluvia, por lo que todos los huecos están, en forma excepcional, totalmente llenos de agua; el suelo está saturado. Posteriormente, comienza su drenado por acción de la gravedad (un proceso que en la mayoría de las ocasiones tarda entre dos y cinco días). El agua que ha sido drenada después de este tiempo representa el rendimiento específico del suelo, mientras que el agua que permanece constituye la retención específica. Cuando esto ocurre, se dice que el suelo está en una condición denominada: "capacidad de campo", que es otra forma de indicar que el suelo mantiene un volumen de agua específico contra la acción de la gravedad.

A medida que el suelo se deseca, se vuelve menos permeable, lo que significa que el agua tiende a mantenerse alrededor de las partículas del suelo en contra de la acción de la gravedad. En teoría, el drenado por gravedad continúa hasta que la fuerza gravitacional no es capaz de vencer las fuerzas de la tensión superficial, que mantienen a la película de agua alrededor de las partículas que componen el suelo. En la práctica, el drenado tiende a detenerse cuando las películas son tan delgadas que el agua no puede continuar su movimiento descendente. Esta es la condición de capacidad de campo. Se da por supuesto que, en la realidad, el drenado para alcanzar la capacidad de campo no se presenta en la forma idealizada descrita anteriormente, pues casi de manera continua se presentan los efectos de la evaporación del suelo y de la extracción de agua, principalmente por acción de las raíces de las plantas. Cuando termina el drenado por gravedad, para efectos prácticos, las raíces de las

plantas comienzan a obtener el agua del volumen retenido por el suelo que la gravedad no fue capaz de drenar, por lo que el contenido de humedad del suelo disminuirá por debajo de la capacidad de campo.

Esta situación ocasiona un déficit de humedad en el suelo, parámetro que generalmente se expresa en términos de milímetros de lluvia que sería necesario que se infiltraran para que el suelo regrese a la condición de capacidad de campo.

A medida que el tiempo se incrementa desde la última lluvia, se utiliza más y más agua del suelo, ya sea por la evaporación de la superficie del suelo o por las plantas. Cuando esto ocurre, las películas de agua alrededor de las partículas del suelo se vuelven cada vez más delgadas, lo que hace cada vez más difícil para las plantas que puedan continuar la extracción del agua del suelo. De este modo, las plantas responden utilizando menos agua: los poros de sus hojas se cierran, de tal modo que transpiran una menor cantidad de agua. Esta reducción en la cantidad de agua en circulación hace que la velocidad de crecimiento de la planta disminuya. Las plantas herbáceas, que no tienen tallos duros, se mantienen verticales porque sus células están llenas de agua, a una presión mayor que la atmosférica. Si se les priva de agua por un tiempo prolongado, las células de la planta comenzarían a perder su rigidez y la planta empezaría a marchitarse. Algunas veces esto sucede en los días muy calurosos, cuando la transpiración de la planta es elevada, aunque exista suficiente agua disponible en el suelo; el sistema de raíces es incapaz de extraer el

agua del suelo con la misma rapidez con que la pierde por la transpiración. En estos casos, la planta se recuperará durante la noche, cuando la transpiración se detenga. Si la planta no logra recuperarse, eso significa que el marchitamiento es ocasionado por una reducción en el agua disponible y no por una demanda elevada de agua. Si no existe agua suficiente en el suelo para alimentar a la planta, se dice que ésta ha alcanzado su punto de marchitamiento permanente. Si posteriormente hubiese agua disponible dentro de un periodo razonable, la planta se recuperará; pero si el déficit de agua se mantiene, la planta morirá.

En 1856 se publicó un informe del trabajo de Darcy en Dijon y de muchos de sus descubrimientos experimentales, con el título de *Les fontaines publiques de la ville de Dijon* (El abastecimiento público de agua en la ciudad de Dijon). En uno de los capítulos, Darcy relata las acciones utilizadas para clarificar el agua, por medio de filtros de arena. Fue precisamente durante el desarrollo de este trabajo que Darcy propuso la relación que lleva su nombre.

1.3 El agua subterránea en movimiento (Ley de Darcy)

Cuando se estudia el flujo de agua o de cualquier otro líquido a través de una unidad acuífera, se utiliza una ley denominada ley de Darcy. Henry Darcy nació en la ciudad de Dijon (Francia) en 1803. En esos tiempos, la ciudad de Dijon tenía problemas por falta de una fuente de agua para el abastecimiento de la población, por lo que Darcy comenzó a trabajar en un proyecto para resolver dicho problema. Diseñó un sistema para captar el agua de una gran fuente que se encontraba a más de 10 km de distancia de Dijon, así como, para entubarla hacia la ciudad y distribuirla hacia algunas tomas públicas.

En 1856 se publicó un informe del trabajo de Darcy en Dijon y de muchos de sus descubrimientos experimentales, con el título de *Les fontaines publiques de la ville de Dijon* (El abastecimiento público de agua en la ciudad de Dijon). En uno de los capítulos, Darcy relata las acciones utilizadas para clarificar el agua, por medio de filtros de arena. Fue precisamente durante el desarrollo de este trabajo que Darcy propuso la relación que lleva su nombre.

Si quisiéramos probar dicha relación, sería necesario utilizar un dispositivo como el que se muestra en la figura siguiente:

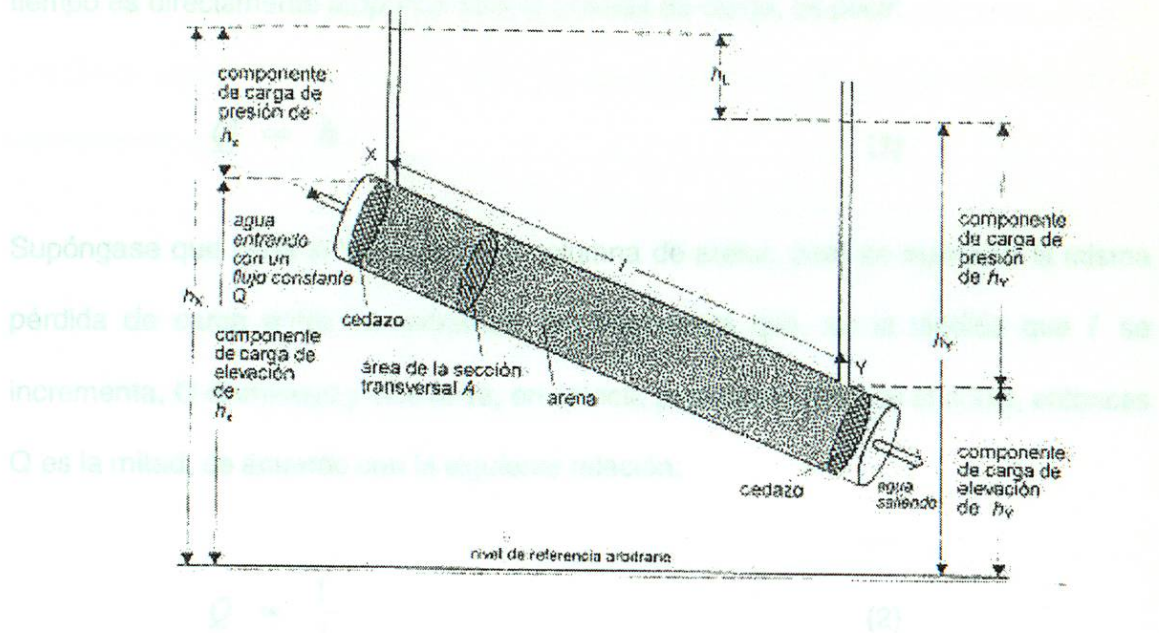


Figura 1. Esquema para explicar la Ley de Darcy.

En la figura 1, se presenta un cilindro con un área (sección transversal) A , lleno de arena que se mantiene entre dos cedazos colocados en los extremos del tubo. El agua fluye por el cilindro a un caudal constante Q , registrado, por ejemplo, en litros por día. También se utilizan manómetros en los puntos X e Y, separados por una distancia l , para medir la carga del agua con respecto a un nivel horizontal de referencia; la diferencia entre las dos cargas es la pérdida de carga h_L .

Si el caudal Q se duplicará, entonces se observaría en el dispositivo que h_L también se duplica; es decir, es necesario utilizar el doble de energía para lograr que el agua fluya

por la tubería con el doble de velocidad. Si el caudal Q disminuye a la mitad, entonces h_L decrece a la mitad, de donde se deduce que el volumen de flujo por unidad de tiempo es directamente proporcional a la pérdida de carga, es decir:

$$Q \propto h_L \quad (1)$$

Supóngase que varía la longitud de la columna de arena, pero se mantiene la misma pérdida de carga entre los extremos. Se encontrará que, en la medida que l se incrementa, Q disminuye y viceversa, en estricta proporción. Si l es el doble, entonces Q es la mitad, de acuerdo con la siguiente relación:

$$Q \propto \frac{1}{l} \quad (2)$$

Al combinar las dos relaciones anteriores, se tiene que:

$$Q \propto \frac{h_L}{l} \quad (3)$$

El término h_L/l se define como el gradiente hidráulico. Por lo tanto, la velocidad del flujo del agua a través de la arena es proporcional al gradiente hidráulico.

Si se pone un cilindro adicional del mismo tipo, a un lado del primero, lleno con el mismo tipo de arena y con el flujo escurriendo en la misma forma, entonces circulará en total el doble de flujo a través del doble de la sección transversal. Entonces, al igual que Darcy lo pensó, es razonable suponer, sin la necesidad de realizar físicamente el experimento, que:

$$Q \propto A \quad (4)$$

En resumen, considerando las relaciones anteriores se llega a:

$$Q \propto A \frac{h_L}{l} \quad (5)$$

Que es lo mismo que:

$$Q = KA \frac{h_L}{l} \quad (6)$$

Donde K es una constante de proporcionalidad.

Cuando se realiza un experimento, es posible medir Q, A, h_L y l , por lo que es posible calcular K. Si se efectúa esta operación y posteriormente se vacía la arena del cilindro, y se la reemplaza con una arena más fina, se repite el experimento y se calcula nuevamente el valor de K, entonces se detectará (como Darcy lo hizo) que el nuevo valor de K es menor que el primero. Si se utiliza una arena más gruesa, entonces K será mayor. K es la permeabilidad, o, en forma más estricta, la

conductividad hidráulica de la arena; una arena gruesa es más permeable que una arena fina, porque los espacios entre las partículas de la arena gruesa son también mayores, lo que permite que el agua se desplace más fácilmente.

La ley de Darcy, expresada en términos simples, establece que un fluido pasa a través de un medio poroso a una velocidad proporcional al producto del área de la sección transversal por la cual el flujo circula, el gradiente hidráulico y la conductividad hidráulica. La ley de Darcy es aplicable según las siguientes condiciones:

- a) El medio poroso por el que fluye el agua, hasta alcanzar el acuífero, se encuentra saturado (zona saturada).
- b) El medio poroso se encuentra saturado con un tipo único de fluido.
- c) El medio poroso es homogéneo (las propiedades del medio poroso son iguales en cualquier punto).
- d) El medio poroso es isótropo (las propiedades del medio poroso son iguales en todas direcciones).
- e) Hay una lámina de fluido en la superficie del medio poroso.
- f) El flujo del fluido es un régimen laminar.

1.4 La contaminación del agua subterránea.

Se utiliza el término contaminación cuando, debido a actividades humanas, una sustancia se incorpora al ambiente (Price Michael, 2007).

El agua superficial, como la de los ríos y los lagos es muy vulnerable a la contaminación. Probablemente sea correcto señalar que los ríos presentan los efectos de la contaminación prácticamente desde el inicio de la especie humana. Esta contaminación normalmente es muy obvia, por lo que en ocasiones ha sido necesario tomar cierto tipo de medidas. De esta suerte, durante el siglo XIX los ríos dejaron de ser considerados como fuentes de abasto de agua para las poblaciones asentadas en sus márgenes, por lo que se construyeron almacenamientos en las partes altas, regiones donde podrían protegerse más fácilmente de la contaminación originada por la población. Los ingenieros sanitarios han desarrollado técnicas para tratar los depósitos de agua más contaminados, de tal modo que, si se tiene la suficiente cantidad de recursos financieros, actualmente casi cualquier fuente puede convertirse en abastecimiento de agua limpia. En forma paralela, actualmente se toman medidas para proteger los ríos y los lagos de las descargas de agua residual sin tratar.

Puede ser que el agua subterránea no sea pura, pero es mucho menos vulnerable que el agua superficial a la contaminación producida por residuos generados tanto en los

núcleos de población como en las industrias. Esta situación dio origen a la suposición errónea de que el agua subterránea es inmune a la contaminación.

En los inicios de la rama de la ciencia encargada de estudiar los acuíferos, se prestaba mayor atención a la cantidad y al rendimiento de un acuífero que a la calidad de su agua. A partir de la Segunda Guerra Mundial, y especialmente desde 1960, los estudios de la calidad del agua subterránea se han incrementado y hacen más énfasis en el estudio de la contaminación y de los movimientos de los contaminantes dentro de los sistemas de agua subterránea. Actualmente se tiene la certeza de que, aunque el agua subterránea está fuera de nuestro alcance visual directo, no está fuera del alcance de la contaminación, y aunque un acuífero contaminado puede ser menos ofensivo a nuestra vista que un río contaminado, eso no significa que la contaminación del agua subterránea sea menos grave que la contaminación del agua superficial.

También es importante reconocer que, comparada con el agua superficial, la contaminación del agua subterránea es más difícil de detectar y observar; además, es más complicado identificar la fuente de la misma. Quizá aún más importante, cuando un acuífero presenta evidencias de contaminación, el trabajo que representa limpiarlo, si esto es posible, es enorme. La máxima de que “vale más prevenir que remediar” tiene más sentido en el caso de la contaminación del agua subterránea que en el del agua superficial.

La contaminación del agua subterránea, ocurre por accidentes, ignorancia o como resultado de otras actividades. La contaminación del agua subterránea puede clasificarse de acuerdo con el tipo de contaminante involucrado: microbiano, químico o radiactivo. Si es del tipo químico, la contaminación del tipo químico puede, a su vez, dividirse en contaminación de tipo orgánico o inorgánico. Otra base para la clasificación de la contaminación consiste en determinar los mecanismos relacionados con la incorporación del contaminante al subsuelo. En primera instancia, es necesario distinguir entre contaminación derivada de fuentes puntuales plenamente identificadas (contaminación puntual) y la derivada de fuentes diseminadas (contaminación difusa). Ejemplos clásicos de contaminación puntual son los tanques de almacenamiento con fugas, fosas sépticas o rellenos en donde se depositan residuos de origen municipal o industrial. La contaminación difusa más común se relaciona con los lixiviados de los fertilizantes químicos que se aplican en las zonas de riego. También es necesario considerar si la contaminación se mantiene durante un periodo largo –quizá a partir de alguna fuga- o si es de tipo instantáneo, como es el caso de un camión que haya sufrido un accidente y el material que transportaba se derramó en el suelo (Michael Price, 2007).

Los sitios para depositar los residuos, anteriormente se conocían como “tiraderos”, nombre descriptivo de las actividades que ahí se veían reflejadas. Por el contrario un relleno controlado, es la práctica de depositar los residuos en una excavación que

normalmente se cubre con tierra u otro material que no es un residuo. La excavación puede tener una protección impermeable o no.

La práctica de los “tiraderos”, surgió para desplazar los métodos anteriores, que consistían simplemente en incinerar los residuos o tirarlos sobre la superficie del terreno. Los primeros “tiraderos”, fueron normalmente minas a cielo abierto y canteras abandonadas que fueron rellenas con residuos de varios tipos, a menudo hasta nivelar el terreno, tratando de llegar a la altura original. Los residuos eran simplemente vertidos en las excavaciones.

A medida que el agua de lluvia se infiltra en los rellenos controlados, ésta puede disolverse y reaccionar con los residuos y formar un lixiviado. El lixiviado que se forma en los rellenos es una fuente potencial y seria de contaminación del agua subterránea (Price Michael, 2007).

1.5 Geología en la zona de estudio.

1.5.1 Geología regional.

El área metropolitana de Monterrey, la cual incluye los alrededores del sitio de estudio esta caracterizada por una aglomeración de sierras montañosas albergando estrechos valles aluviales. Una de las estructuras representativas de la región es el Cerro de la Silla, la cual esta formada por rocas sedimentarias cuyas edades varían desde Jurásico Superior, incluyendo lutitas intercaladas con areniscas conglomeráticas de la Formación la Casita; del Cretácico Inferior las calizas de las formaciones Taraises y Cupido, las lutitas de la Formación la Peña y más recientemente las calizas de la formación Aurora y Cuesta del Cura, y finalmente del Cretácico Superior, las calizas lutitas, lutitas calcáreas y lutitas de las formaciones Agua Nueva, San Felipe y Méndez, respectivamente. Sobre todos estos paquetes de rocas sedimentarias yace el conglomerado calcáreo del Terciario, que incluye intercalación de fragmentos de caliche en la zona de estudio. Finalmente, en la parte superior de la columna estratigráfica se encuentran los depósitos aluviales del Cuaternario, compuestos por sedimentos terrígenos tales como arcillas derivadas de lutitas y suelos. Los suelos predominantes son del tipo vertisoles, mezclados con rendzinas y litosoles y en menor abundancia regosoles (INEGI, 1999).

Desde el punto de vista geomorfológico, el área metropolitana de Monterrey se encuentra en un estado temprano de madurez, mostrando un patrón de drenaje bien integrado con varias corrientes fluyendo desde las elevaciones de las montañas hacia

los valles. En general, estos sistemas de drenaje depositan enormes cantidades de materiales clásticos al pie de las montañas, en tanto que los materiales más finos son depositados en los valles.

1.5.2 Geología local.

Las rocas que yacen bajo la superficie correspondientes a las lutitas de la Formación Méndez han sufrido un fracturamiento intenso asociado a movimientos que dieron lugar a las fallas que se han identificado en el subsuelo y que se supone están relacionadas a los procesos de deformación que dieron origen al levantamiento de la Sierra Madre Oriental.

1.6 Generación y composición del lodo.

El lodo que es dispuesto finalmente en el relleno motivo del presente estudio proviene de una planta de tratamiento de agua residual de origen industrial. Esa agua residual industrial es generada por un proceso de producción de muebles cerámicos.

El agua residual industrial proveniente del proceso de producción de muebles cerámicos es principalmente generada por las actividades de limpieza de pisos y lavados de equipo y maquinaria, en las áreas de moldeo de las piezas de muebles cerámicos y del área de aplicación de esmalte a dichas piezas.

El agua residual industrial producto de las actividades de limpieza de pisos y lavado de equipos y maquinaria del área de moldeo de las piezas de muebles cerámicos contiene una gran cantidad de sólidos suspendidos totales. Los sólidos suspendidos totales provienen principalmente del barro de arcilla, sílica cristalina y feldespato. El barro de arcilla, la sílica y el feldespato están constituidos por silicato de aluminio hidratado, óxido de silicio y silicato de aluminio y sodio, respectivamente.

El agua residual que proviene de las actividades de limpieza de pisos y lavado de equipo y maquinaria del área de esmaltado de las piezas de muebles cerámicos moldeados contiene residuos del material utilizado para esmaltar dichas piezas. El material para esmaltar los muebles cerámicos contiene óxido de zinc.

El agua residual que combina las corrientes provenientes del área de moldeo y de esmaltado de las piezas de muebles cerámicos es enviada a la planta de tratamiento de agua residual. El tratamiento del agua residual industrial es un proceso físico-químico. Los materiales utilizados para la floculación de los sólidos suspendidos del agua residual industrial contienen cloruros.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que ilustra la generación del agua residual industrial, así como también, la generación del lodo que es dispuesto finalmente en el relleno.

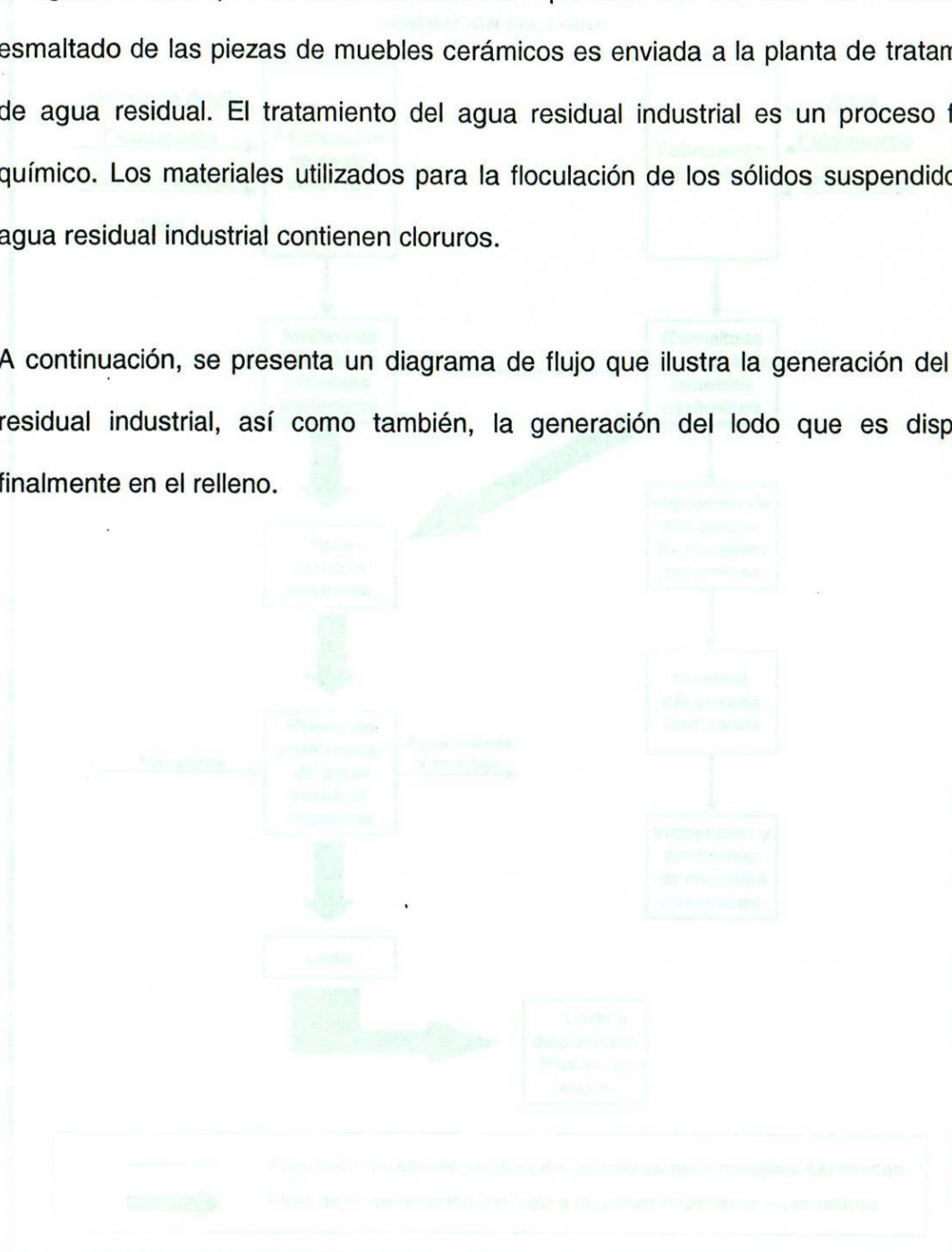


Diagrama 1. Generación de lodo.

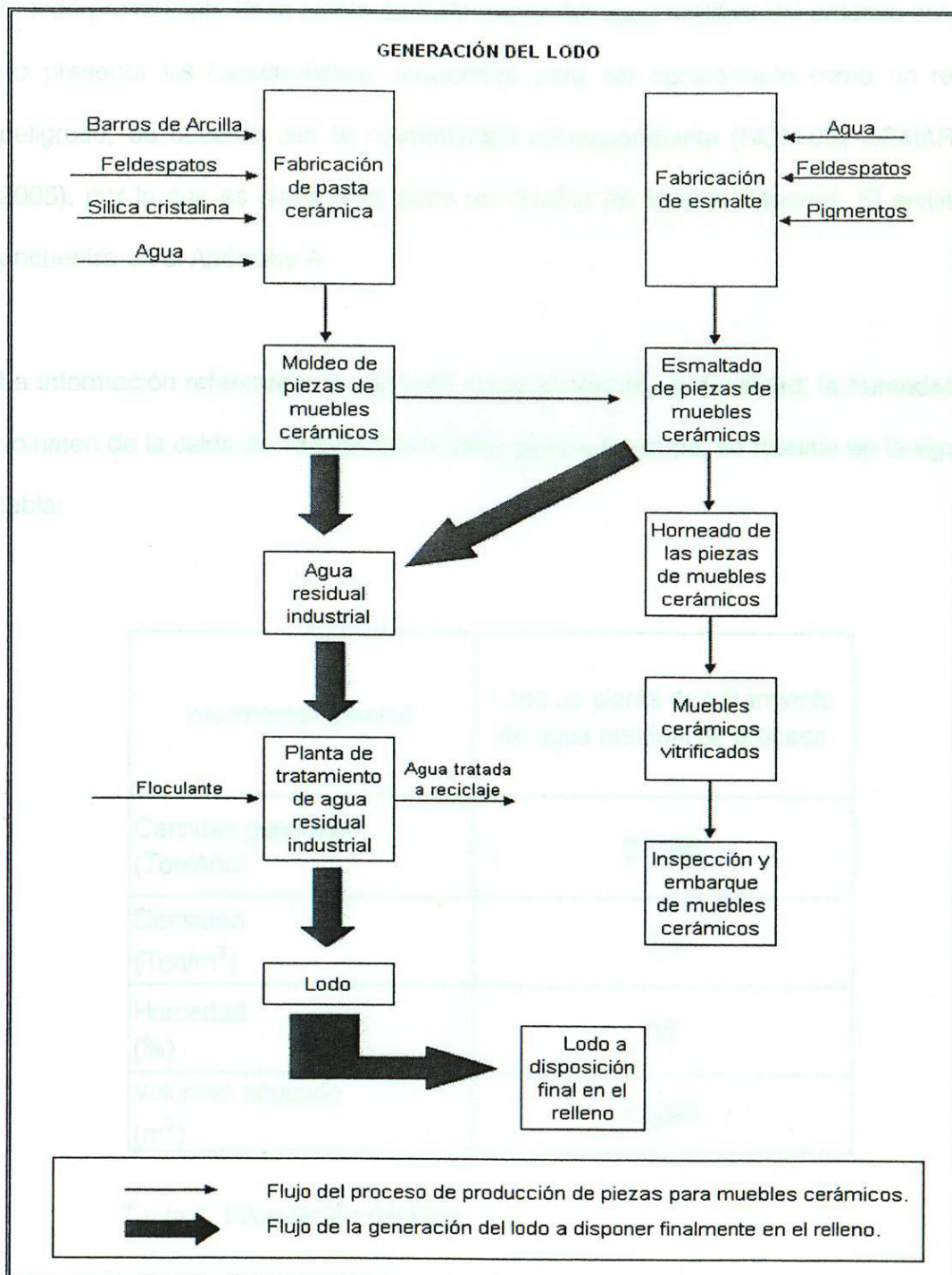


Diagrama 1. Generación de lodo.

El lodo proveniente de la planta de tratamiento del agua residual del proceso cerámico no presenta las características requeridas para ser considerado como un residuo peligroso, de acuerdo con la normatividad correspondiente (NOM-052-SEMARNAT-2005), por lo que es clasificado como un residuo de Manejo Especial. El análisis se encuentra en el Apéndice A.

La información referente a la cantidad anual generada, la densidad, la humedad, y el volumen de la celda del relleno que el lodo generado ocupa, se resume en la siguiente tabla:

Información general	Lodo de planta de tratamiento de agua residual de proceso
Cantidad generada (Ton/Año)	21,900
Densidad (Ton/m ³)	1.4
Humedad (%)	28
Volumen ocupado (m ³)	15,643

Tabla 1. Información del lodo.

A continuación se muestra una figura que describe la geometría y las dimensiones de una celda típica del relleno:

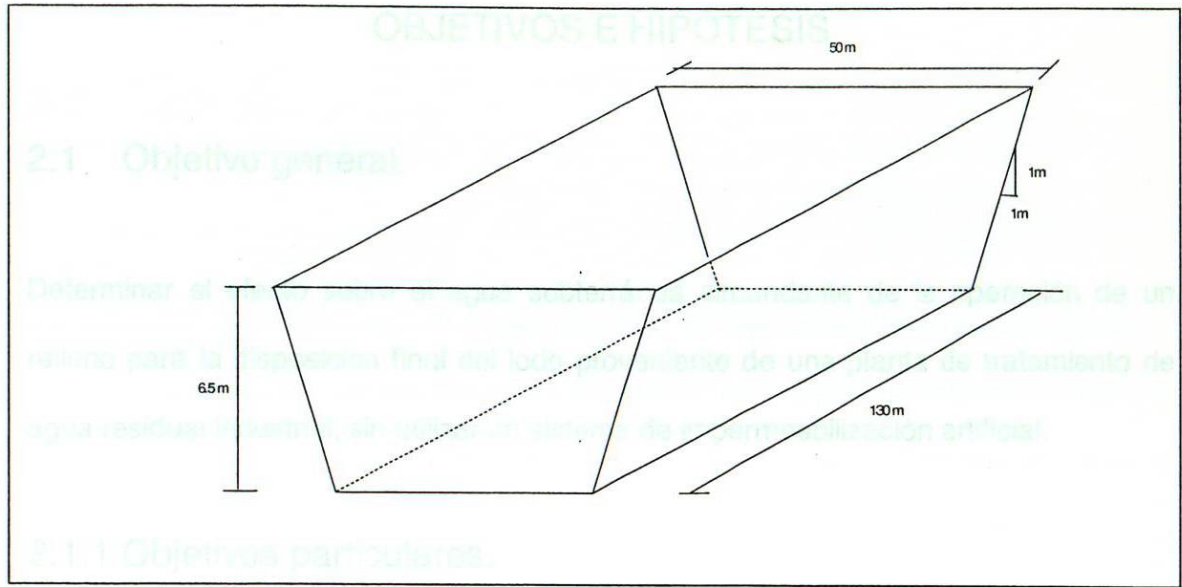


Figura 2. Celda del relleno.

Asumiendo que la celda es un rectángulo, el espesor anual de la capa de lodos, se puede determinar como sigue:

$$\text{Área disponible en la celda} = (130 \text{ m})(50 \text{ m}) = 6,500 \text{ m}^2$$

$$\text{Espesor anual de la capa de lodo} = 15,643 \text{ m}^3 / 6,500 \text{ m}^2$$

$$\text{Espesor anual de la capa de lodo} = 2.4 \text{ m.}$$

$$\text{Espesor anual de la capa de lodo} = 7.9 \text{ ft.}$$

CAPITULO 2

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivo general.

Determinar el efecto sobre el agua subterránea circundante de la operación de un relleno para la disposición final del lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual industrial, sin utilizar un sistema de impermeabilización artificial.

2.1.1 Objetivos particulares.

- Estimar la factibilidad de la generación de lixiviados en la operación del relleno.
- Estimar la cantidad de lixiviado que potencialmente podría alcanzar el nivel freático por infiltración.
- Estimar el tiempo en el que el potencial lixiviado alcanzaría el nivel freático por infiltración.
- Determinar experimentalmente el efecto sobre el agua subterránea, de la operación de un relleno para la disposición final del lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual industrial, sin utilizar un sistema de impermeabilización artificial.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS.

2.2 Hipótesis.

La operación del relleno para la disposición final de lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual industrial, sin utilizar un sistema de impermeabilización artificial, no afecta el agua subterránea del acuífero sobre el cual se encuentra dicho relleno.

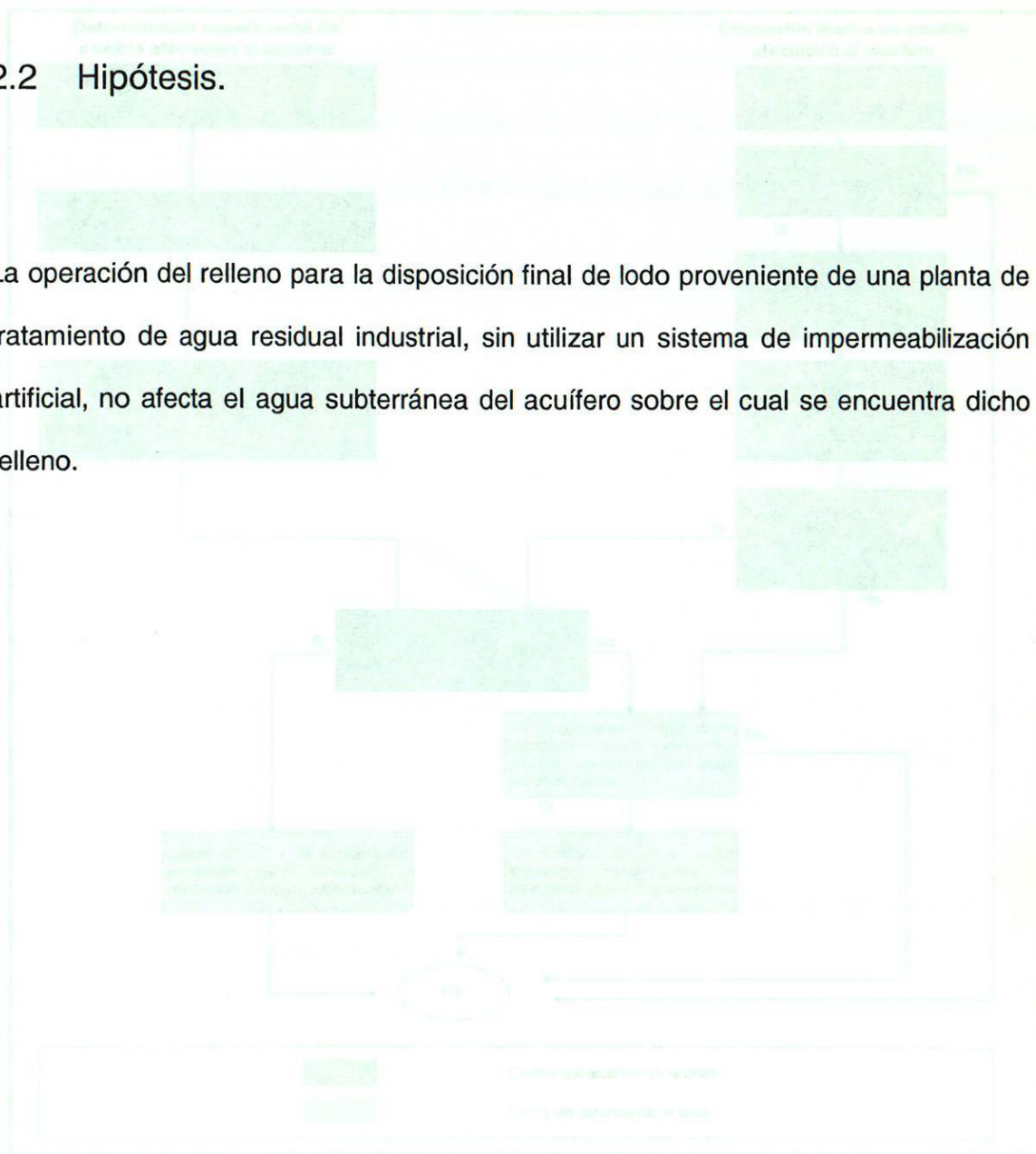


Figura 2.1. Estrategia general de la investigación.

CAPITULO 3

MÉTODOS.

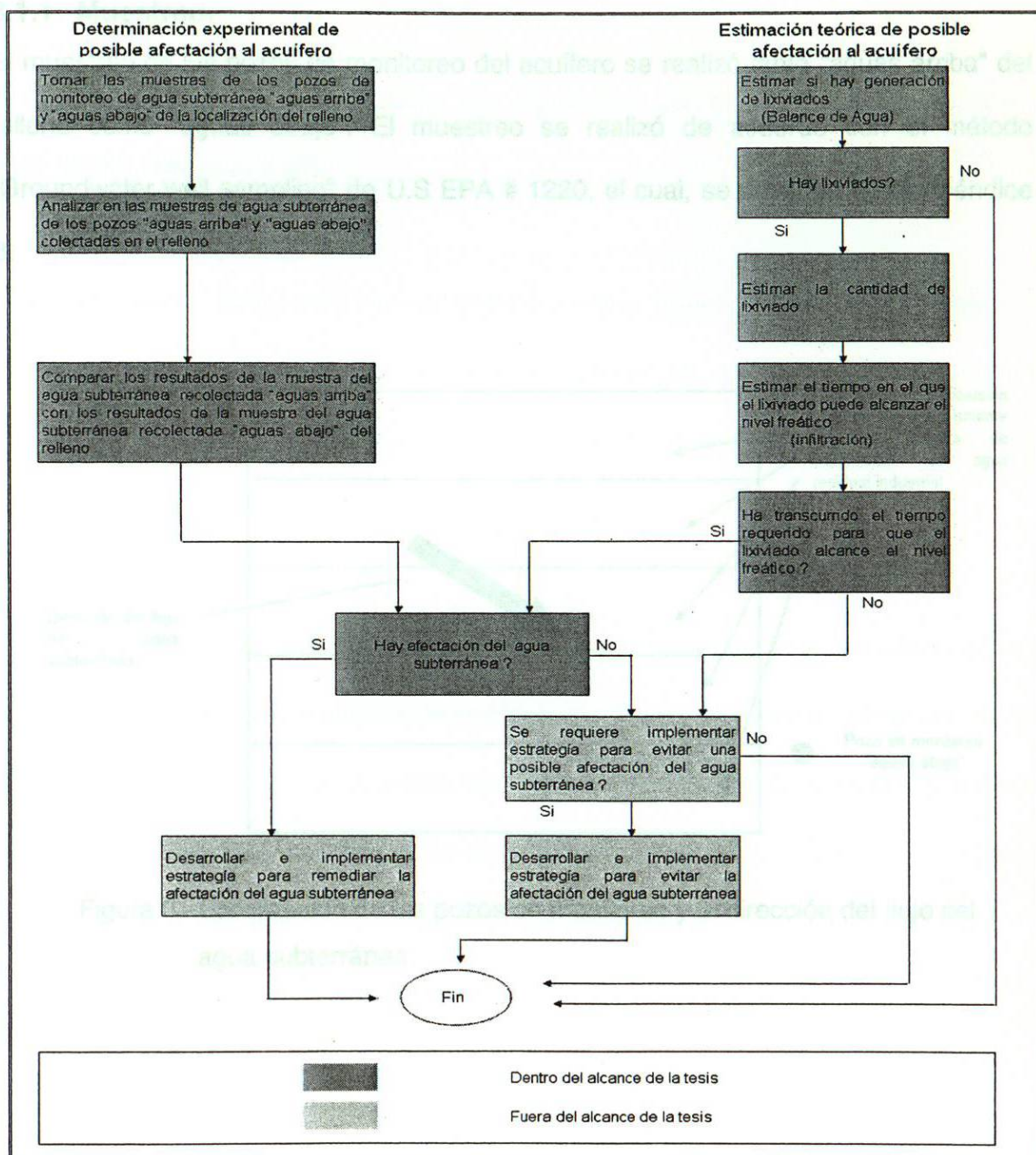


Diagrama 2. Gráfico de la estrategia general.

3.1 Determinación experimental de la posible afectación al acuífero.

3.1.1 Muestreo.

El muestreo de los pozos de monitoreo del acuífero se realizó tanto “aguas arriba” del relleno como “aguas abajo”. El muestreo se realizó de acuerdo con el método “Groundwater well sampling” de U.S EPA # 1220, el cual, se describe en el Apéndice B.

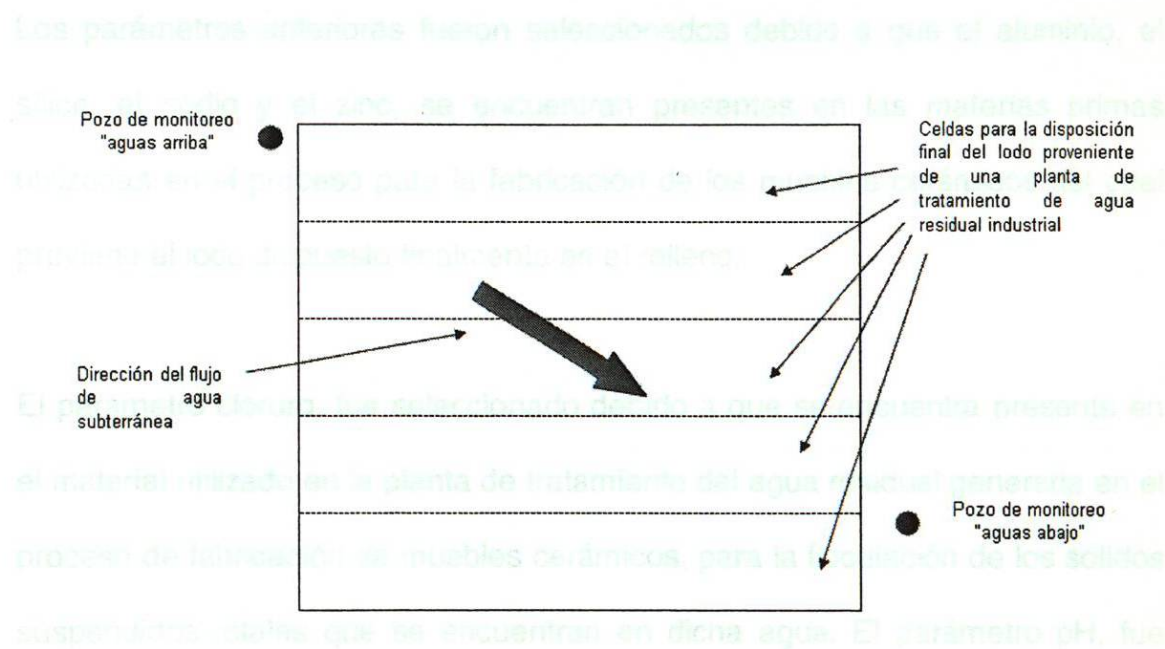


Figura 3. Localización de los pozos de monitoreo y la dirección del flujo del agua subterránea.

3.1.2 Análisis de las muestras.

A las muestras se les analizaron los siguientes parámetros: sílice, aluminio, zinc, sodio, cloruros y pH.

Los parámetros anteriores fueron seleccionados debido a que el aluminio, el sílice, el sodio y el zinc, se encuentran presentes en las materias primas utilizadas en el proceso para la fabricación de los muebles cerámicos del cual proviene el lodo dispuesto finalmente en el relleno.

El parámetro cloruro, fue seleccionado debido a que se encuentra presente en el material utilizado en la planta de tratamiento del agua residual generada en el proceso de fabricación de muebles cerámicos, para la floculación de los sólidos suspendidos totales que se encuentran en dicha agua. El parámetro pH, fue seleccionado para tener una referencia del grado de acidez o alcalinidad que el agua subterránea pudiera presentar.

La determinación de las concentraciones de los diferentes parámetros seleccionados, se realizó de acuerdo con los métodos siguientes:

- a) Método NMX-AA-051-SCFI-2001, para la determinación de sílice.
- b) Método NMX-AA-051-SCFI-2001, para la determinación de aluminio.
- c) Método NMX-AA-051-SCFI-2001, para la determinación de sodio.
- d) Método NMX-AA-051-SCFI-2001, para la determinación de zinc.
- e) Método NMX-AA-073-SCFI-2001, para la determinación de cloruros.
- f) Método NMX-AA-008-SCFI-2000, para la determinación del pH.

3.1.3 Comparación de los resultados.

Una vez determinados las concentraciones de cada uno de los parámetros seleccionados, se procedió a la comparación de los valores de cada uno de ellos, con la finalidad de determinar la existencia de alguna diferencia importante que pudiera ser explicada por la operación del relleno sin la utilización de un sistema de impermeabilización artificial.

Los resultados de las muestras colectadas “aguas arriba” y “aguas abajo”, se encuentran en el Apéndice C.

3.2 Estimación teórica de la posible afectación al acuífero.

La estimación teórica de la posible afectación al acuífero toma su importancia como un soporte a la determinación experimental de la posible afectación al agua subterránea, debido a la operación del relleno sin el uso de un sistema de impermeabilización artificial.

3.2.1 Estimación de la generación de lixiviados en la operación del relleno.

La estimación de la generación de lixiviados se realiza de acuerdo con el diagrama de flujo siguiente:

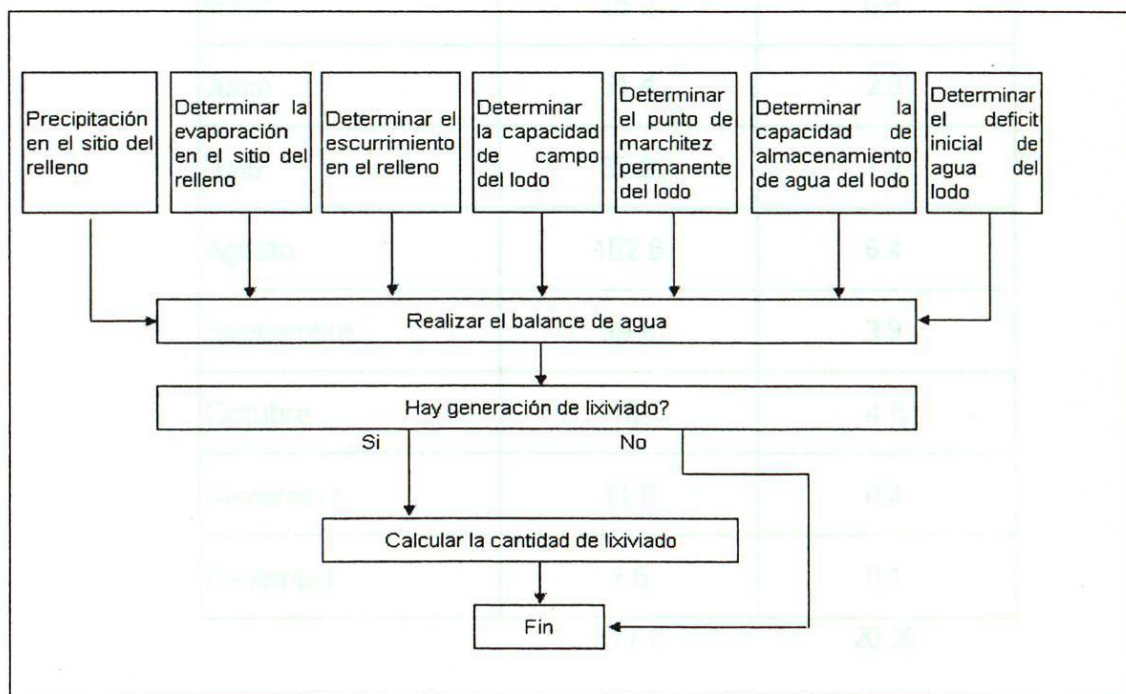


Diagrama 3. Determinación de los lixiviados.

a) Precipitación en el sitio del relleno.

La precipitación, de acuerdo con los datos proporcionados por el INEGI, en el sitio del relleno, se presenta en la tabla siguiente:

Mes	Precipitación (mm)	Precipitación (in)
Enero	5.0	0.2
Febrero	3.8	0.1
Marzo	3.3	0.1
Abril	13.4	0.5
Mayo	15.2	0.6
Junio	51.4	2.0
Julio	33.9	1.3
Agosto	162.6	6.4
Septiembre	99.8	3.9
Octubre	116.1	4.6
Noviembre	11.0	0.4
Diciembre	1.5	0.1
	517.0	20.35

Tabla 2. Precipitación en el sitio del relleno.

b) Evaporación en el sitio de relleno.

Los datos de evaporación estimados para el sitio del relleno se presentan en la tabla siguiente:

Mes	Evaporación (mm)	Evaporación (in)
Enero	46.8	1.8
Febrero	61.8	2.4
Marzo	91.8	3.6
Abril	113.1	4.5
Mayo	132.0	5.2
Junio	159.0	6.3
Julio	174.0	6.9
Agosto	165.0	6.5
Septiembre	100.2	3.9
Octubre	65.7	2.6
Noviembre	58.8	2.3
Diciembre	47.4	1.9
	1215.6	47.9

Tabla 3. Evaporación en el sitio del relleno.

El método y la estimación de la evaporación en el sitio del relleno se encuentran en el Apéndice D.

c) Escurrimiento en el sitio del relleno.

Los datos de escurrimiento dependen de la pendiente de la superficie, del tipo de superficie o material y de la existencia o no de vegetación en el lugar donde ocurre la precipitación.

A continuación se presentan valores de escurrimiento citados por Tchobanoglous, George.

Tipo de material	Pendiente (%)	Coeficiente de escurrimiento			
		Con vegetación		Sin vegetación	
		Rango	Típico	Rango	Típico
Marga arenosa	2	0.05 - 0.10	0.06	0.06 - 0.14	0.10
	3 - 6	0.10 - 0.15	0.12	0.14 - 0.24	0.18
	7	0.15 - 0.20	0.17	0.20 - 0.30	0.24
Marga lodosa	2	0.12 - 0.17	0.14	0.25 - 0.35	0.30
	3 - 6	0.17 - 0.25	0.22	0.35 - 0.45	0.40
	7	0.25 - 0.36	0.30	0.45 - 0.55	0.50
Arcilla compacta	2	0.22 - 0.33	0.25	0.45 - 0.55	0.50
	3 - 6	0.30 - 0.40	0.35	0.55 - 0.65	0.60
	7	0.40 - 0.50	0.45	0.65 - 0.75	0.70

Tabla 4. Escurrimiento en el relleno.

En el caso del relleno, dado que éste se encuentra por debajo del nivel de suelo natural, el agua de lluvia que cae directamente en la celda, queda atrapada, por lo que el escurrimiento es nulo.

- d) Estimación de la capacidad de campo y el punto de marchitez del lodo.

Los valores típicos de la capacidad e campo y el punto permanente de marchitez para diferentes tipos de suelos, citados por Tchobanoglous, George, se muestran en la tabla siguiente:

Clasificación de suelos	Valor (%)			
	Capacidad de campo (FC)		Punto permanente de marchitez (PWP)	
	Rango	Típico	Rango	Típico
Arena	6 - 12	6	2 - 4	4
Arena fina	8 - 16	8	3 - 6	5
Marga arenosa	10 - 18	14	4 - 8	6
Marga Arenosa fina	14 - 22	18	6 - 10	8
Marga	18 - 26	22	8 - 12	10
Marga lodosa	19 - 28	24	9 - 14	10
Marga ligera de arcilla	20 - 30	26	10 - 15	11
Marga de arcilla	23 - 31	27	11 - 15	12
Arcilla lodosa	27 - 35	31	12 - 17	15
Marga pesada de arcilla	29 - 36	32	14 - 18	16
Arcilla	31 - 39	35	15 - 19	17

Tabla 5. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

a) Estimación de la capacidad de almacenamiento de agua del lodo.

La capacidad de almacenamiento de humedad de la capa de arcilla, es:

Debido a la composición del lodo, se tomarán los valores correspondientes a una arcilla.

$$\text{Capacidad de almacenamiento de humedad} = (2.2 \text{ in/ft})(7.9 \text{ ft})$$

La capacidad de campo del lodo, es:

$$\text{Capacidad de almacenamiento de humedad} = 17.4 \text{ in}$$

$$\text{Capacidad de campo de la capa de lodo} = (0.35)(12 \text{ in/ft})$$

$$\text{Capacidad de campo de la capa de lodo} = 4.2 \text{ in/ft}$$

El déficit inicial de humedad de la capa de lodo es:

El punto permanente de marchitez de la capa de lodo, es:

$$\text{Déficit inicial de humedad} = (4.2 \text{ in/ft})(12 \text{ ft}) = 50.4 \text{ in}$$

$$\text{Punto permanente de marchitez} = (0.17)(12 \text{ in/ft})$$

$$\text{Déficit inicial de humedad} = (3.4 - 2.0) \text{ in/ft} = 1.4 \text{ in/ft}$$

$$\text{Punto permanente de marchitez} = 2.0 \text{ in/ft}$$

$$\text{Déficit inicial de humedad} = (1.4 \text{ in/ft})(7.9 \text{ ft})$$

$$\text{Déficit inicial de humedad} = 11.1 \text{ in}$$

- e) Estimación de la capacidad de almacenamiento de agua del lodo.

La capacidad de almacenamiento de humedad de la capa de arcilla, es:

$$\text{Capacidad de almacenamiento de humedad} = (4.2 - 2.0) \text{ in/ft} = 2.2 \text{ in/ft}$$

$$\text{Capacidad de almacenamiento de humedad} = (2.2 \text{ in/ft})(7.9 \text{ ft})$$

$$\text{Capacidad de almacenamiento de humedad} = 17.4 \text{ in}$$

- f) Estimación del déficit inicial de agua del lodo.

El déficit inicial de humedad de la capa de lodo, es:

$$\text{Déficit inicial de humedad} = (4.2 \text{ in/ft})(0.8) = 3.4 \text{ in/ft}$$

$$\text{Déficit inicial de humedad} = (3.4 - 2.0) \text{ in/ft} = 1.4 \text{ in/ft}$$

$$\text{Déficit inicial de humedad} = (1.4 \text{ in/ft})(7.9 \text{ ft})$$

$$\text{Déficit inicial de humedad} = 11.1 \text{ in}$$

g) Balance de agua.

La estimación de la cantidad de agua que percola a través de una capa compuesta únicamente de tierra (suelo), se realiza utilizando el balance de agua hidrológico estándar.

$$\Delta S = P - R - E - PER$$

La cantidad de agua que percola una capa de tierra (suelo) depende de las condiciones hidrológicas, como son, la pendiente de la capa de tierra (suelo), y si existe o no vegetación en su superficie. Considérese una capa de tierra (suelo) como la mostrada a continuación:

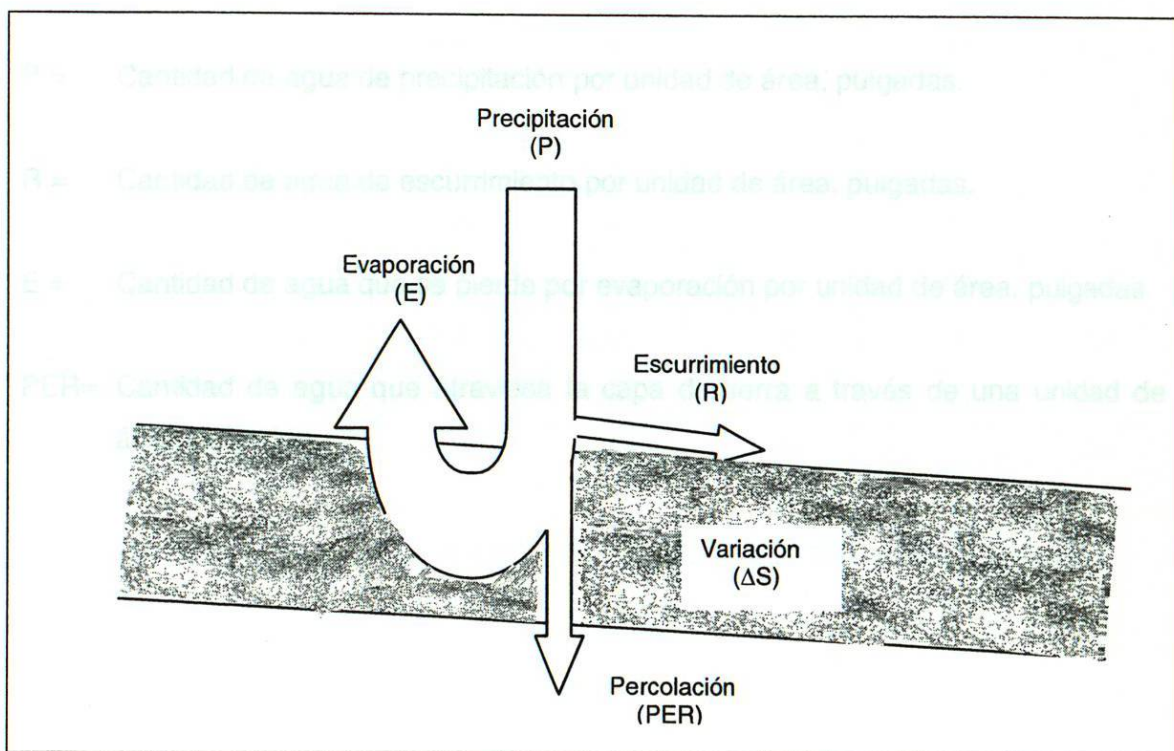


Figura 4. Balance de agua en una capa de suelo.

La cantidad de agua que potencialmente puede atravesar la capa de tierra es

El balance de agua para la capa de tierra (suelo) antes mostrada se puede determinar mediante la siguiente expresión, citada por Tchobanoglous, George.

$$\Delta S = P - R - E - \text{PER} \quad (7)$$

Donde:

ΔS = Cambio en la cantidad de agua mantenida en una unidad de volumen de la capa de tierra, pulgadas.

P = Cantidad de agua de precipitación por unidad de área, pulgadas.

R = Cantidad de agua de escurrimiento por unidad de área, pulgadas.

E = Cantidad de agua que se pierde por evaporación por unidad de área, pulgadas.

PER = Cantidad de agua que atraviesa la capa de tierra a través de una unidad de área, pulgadas.

Tabla 3. Balance de agua en la capa de 1000 de la celda (100% de evaporación)

La cantidad de agua que potencialmente puede atravesar la capa de lodo, se determina mediante la siguiente tabla:

Mes	Precipitación (in)	Evaporación (in)	Escurrimiento (in)	Ganancia (+) o Pérdida (-) de Humedad (in)	Deficit en la capa de arcilla (in)	Infiltración Potencial (in)
Enero	0.20	1.84	0.00	-1.65	-12.75	0.00
Febrero	0.15	2.43	0.00	-2.28	-15.03	0.00
Marzo	0.13	3.61	0.00	-3.48	-17.40	0.00
Abril	0.53	4.45	0.00	-3.93	-17.40	0.00
Mayo	0.60	5.20	0.00	-4.60	-17.40	0.00
Junio	2.02	6.26	0.00	-4.24	-17.40	0.00
Julio	1.33	6.85	0.00	-5.52	-17.40	0.00
Agosto	6.40	6.50	0.00	-0.09	-17.40	0.00
Septiembre	3.93	3.94	0.00	-0.02	-17.40	0.00
Octubre	4.57	2.59	0.00	1.98	-15.42	0.00
Noviembre	0.43	2.31	0.00	-1.88	-17.30	0.00
Diciembre	0.06	1.87	0.00	-1.81	-17.40	0.00
	20.35	47.86		-27.50		0.00

Tabla 6. Balance de agua en la capa de lodo de la celda (100% de evaporación).

En el cálculo anterior se deduce el 100 % de la evaporación al valor de la precipitación; pero en estudios citados en la bibliografía que aborda el aspecto de generación y control de lixiviados se expresa que en un terreno al aire libre y con vegetación sólo se evapora un 70 % de la precipitación y que en el caso específico de un relleno abierto (celda abierta), la pérdida de agua por el mecanismo de evaporación podría ser sólo de la mitad a dos terceras partes de este último valor (Glynn Henry, 1999).

Al efectuar el cálculo con el criterio del párrafo anterior se tienen los siguientes valores:

Mes	Precipitación (in)	Evaporación (35 % de la precipitación) (in)	Escurrimiento (in)	Ganancia o Pérdida de agua (in)	Deficit de agua en la capa de arcilla (in)	Infiltración potencial agua potencial (in)
Enero	0.20	0.07	0.00	0.13	11.00	0.00
Febrero	0.10	0.04	0.00	0.07	10.94	0.00
Marzo	0.10	0.04	0.00	0.07	10.87	0.00
Abril	0.50	0.18	0.00	0.33	10.55	0.00
Mayo	0.60	0.21	0.00	0.39	10.16	0.00
Junio	2.00	0.70	0.00	1.30	8.86	0.00
Julio	1.30	0.46	0.00	0.85	8.01	0.00
Agosto	6.40	2.24	0.00	4.16	3.85	0.00
Septiembre	3.90	1.37	0.00	2.54	1.32	0.00
Octubre	4.60	1.61	0.00	2.99	0.00	1.68
Noviembre	0.40	0.14	0.00	0.26	0.00	0.30
Diciembre	0.10	0.04	0.00	0.07	0.00	0.10
	20.2	7.1		13.13		2.08

Tabla 7. Balance de agua en la capa de lodo de la celda (35 % de evaporación).

3.2.2 Estimación de la cantidad de lixiviado.

Para estimar el volumen de agua que anualmente atraviesa la capa de lodo, se asume que la base de la celda es rectangular.

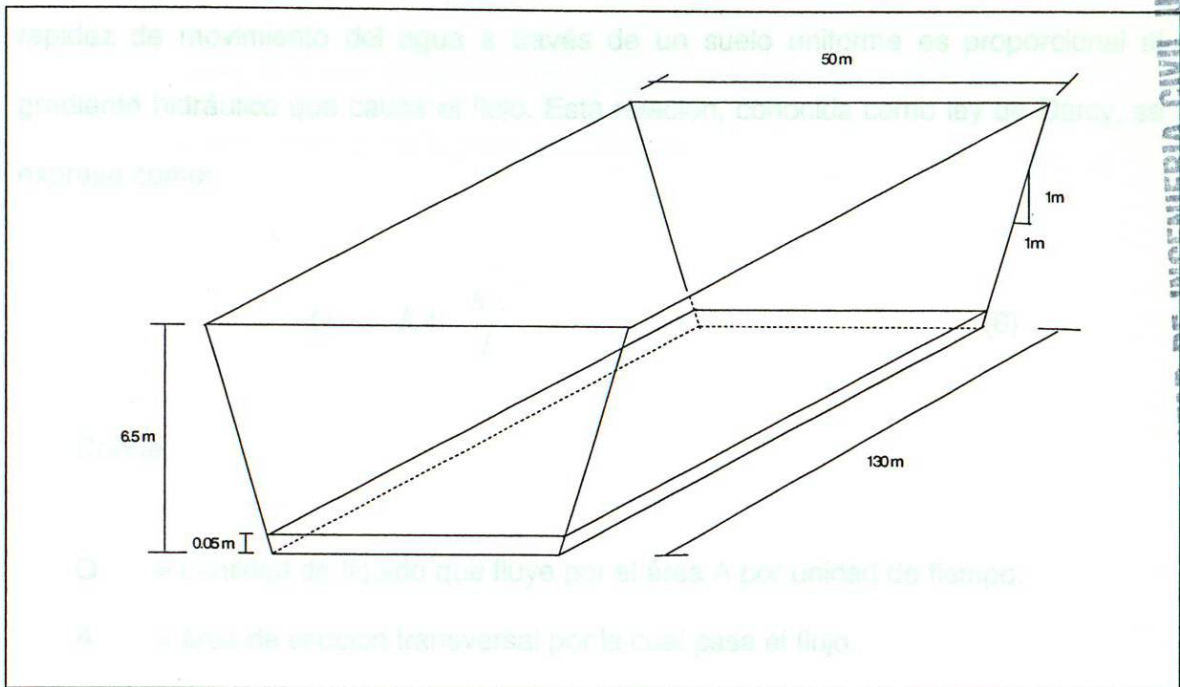


Figura 5. Celda del relleno con la capa de agua de lixiviado en el fondo.

Volumen anual de agua que atraviesa la capa de lodo = $(130 \text{ m})(50 \text{ m})(0.05 \text{ m})$

Volumen anual de agua que atraviesa la capa de lodo = 325 m^3

3.2.3 Estimación del tiempo en que el lixiviado alcanza al acuífero.

Una vez que se alcanza la capacidad de campo del lodo (capacidad máxima de absorción de agua), el lodo ya no absorbe más agua, por lo que el agua remanente emigra a través del suelo subyacente hacia el nivel freático. En estas condiciones, la rapidez de movimiento del agua a través de un suelo uniforme es proporcional al gradiente hidráulico que causa el flujo. Esta relación, conocida como ley de Darcy, se expresa como:

$$Q = KA \frac{h_L}{l} \quad (6)$$

Donde:

Q = cantidad de líquido que fluye por el área A por unidad de tiempo.

A = área de sección transversal por la cual pasa el flujo.

l = distancia sobre la cual actúa el diferencial de agua.

h_L = pérdida de carga entre la elevación mayor y menor de la superficie de agua "libre".

K = coeficiente de conductividad hidráulica (depende del tipo de suelo).

La relación: $\frac{h_L}{l}$, es conocida como gradiente hidráulico.

La ley de Darcy, también puede ser expresada como:

$$Q = nvA \quad (8)$$

Donde:

v = velocidad a la cual el líquido viaja a través de la zona no saturada.

n = porosidad efectiva de la zona no saturada.

Igualando las ecuaciones 6 y 8:

$$nvA = KA \frac{h_L}{l} \quad (9)$$

Se obtiene:

$$v = \frac{KA \frac{h_L}{l}}{nA} \quad (10)$$

$$v = \frac{K \frac{h_L}{l}}{n} \quad (11)$$

Como:

$$\text{velocidad} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} \quad (12)$$

Entonces:

$$\text{tiempo} = \frac{\text{distancia}}{\text{velocidad}} \quad (13)$$

$$t = \frac{l}{v}$$

Donde:

t = tiempo en que el agua viaja a través de la zona no saturada y alcanza el nivel freático.

Figura 6. Diagrama de flujo de agua en una zona no saturada y al acuífero

La siguiente figura representa la configuración de la celda, la diferencia de elevación del agua que se encuentra en el fondo de la celda y la elevación del acuífero, así como también el grosor de la capa de lutita que separa el fondo de la celda del acuífero.

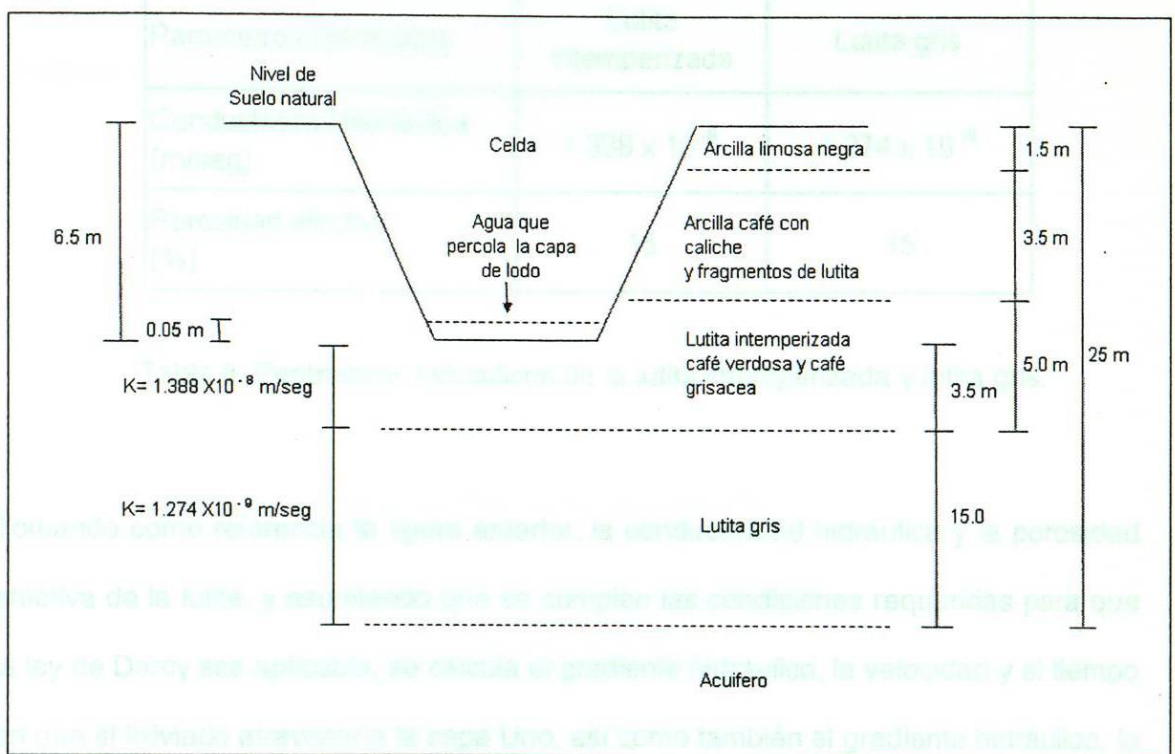


Figura 6. Ilustración de la celda, la capa de lutita y el acuífero.

Los parámetros hidráulicos de la capa de lutita que separa el lixiviado en el fondo de la celda y el nivel freático del acuífero se muestran en la siguiente tabla:

Características	Capa Uno	Capa Dos
Parámetros hidráulicos	Lutita intemperizada	Lutita gris
Conductividad hidráulica (m/seg)	1.338×10^{-8}	1.274×10^{-9}
Porosidad efectiva (%)	15	15

Tabla 8. Parámetros hidráulicos de la lutita intemperizada y lutita gris.

Tomando como referencia la figura anterior, la conductividad hidráulica y la porosidad efectiva de la lutita, y asumiendo que se cumplen las condiciones requeridas para que la ley de Darcy sea aplicable, se calcula el gradiente hidráulico, la velocidad y el tiempo en que el lixiviado atravesaría la capa Uno, así como también el gradiente hidráulico, la velocidad y el tiempo en que el lixiviado alcanzaría el nivel freático, es decir, atravesaría la Capa Dos.

1) Capa Uno

a) Gradiente hidráulico:

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{\text{espesor de la capa de lixiviado} + \text{espesor de lutita intemperizada}}{\text{espesor de lutita intemperizada}}$$

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{0.05 \text{ m} + 3.5 \text{ m}}{3.5 \text{ m}}$$

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{3.55 \text{ m}}{3.5 \text{ m}}$$

$$\text{Gradiente hidráulico} = 1.00$$

b) Velocidad a la que el agua viaja por la capa de lutita:

$$\text{velocidad} = \frac{(\text{conductividad hidráulica de lutita})(\text{gradiente hidráulico})}{\text{porosidad efectiva de la lutita}}$$

Como la conductividad hidráulica de la lutita es:

$$K = 1.338 \times 10^{-8} \text{ m/seg}$$

$$K = (1.338 \times 10^{-8} \text{ m/seg})(86,400 \text{ seg/día})(365 \text{ días/año})$$

$$K = 0.421 \text{ m/año}$$

2) Capa Uno

Entonces:

a) Gradiente hidráulico:

$$\text{velocidad} = \frac{(0.421 \text{ m/año})(1.0)}{0.15}$$

Gradiente hidráulico = $\frac{\text{cambio de altura}}{\text{espesor de la capa}}$

$$\text{Velocidad} = 2.8 \text{ m/año}$$

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{15 \text{ m}}{15 \text{ m}}$$

c) Tiempo en que el lixiviado atraviesa la capa Uno

$$\text{Gradiente hidráulico} = 1.00$$

$$\text{tiempo} = \frac{\text{espesor de la capa de lutita (del fondo de la celda hasta inicio de la lutita gris)}}{\text{velocidad a la cual el lixiviado viaja a través de la capa de lutita intemperizada}}$$

$$\text{tiempo} = \frac{3.5 \text{ m}}{2.8 \text{ m/año}}$$

Gradiente hidráulico de lutita gris (gradiente hidráulico)
permeabilidad efectiva de la lutita gris

$$\text{tiempo} = 1.25 \text{ años}$$

Gradiente hidráulico de la lutita gris, es

$$K = 1.274 \times 10^{-5} \text{ m/seg}$$

$$K = (1.274 \times 10^{-5} \text{ m/seg})(86,400 \text{ seg/día})(365 \text{ días/año})$$

$$K = 0.040 \text{ m/año}$$

2) Capa Dos

a) Gradiente hidráulico:

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{\text{espesor de lutita gris}}{\text{espesor de lutita gris}}$$

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{15 \text{ m}}{15 \text{ m}}$$

$$\text{Gradiente hidráulico} = 1.00$$

b) Velocidad a la que el agua viaja por la capa de lutita gris:

$$\text{velocidad} = \frac{(\text{conductividad hidráulica de lutita gris})(\text{gradiente hidráulico})}{\text{porosidad efectiva de la lutita gris}}$$

Como la conductividad hidráulica de la lutita gris, es:

$$K = 1.274 \times 10^{-9} \text{ m/seg}$$

$$K = (1.274 \times 10^{-9} \text{ m/seg})(86,400 \text{ seg/día})(365 \text{ días/año})$$

$$K = 0.040 \text{ m/año}$$

Entonces:

El Tiempo total para que el lixiviado alcance el río es:

$$\text{velocidad} = \frac{(0.040 \text{ m/año})(1.0)}{0.15}$$

$$\text{Velocidad} = 0.266 \text{ m/año}$$

Tiempo total = 57.3 años

c) Tiempo en que el lixiviado atraviesa la capa Dos

Tiempo para atravesar la Capa Dos

$$\text{tiempo} = \frac{\text{espesor de la capa de lutita gris}}{\text{velocidad a la cual el lixiviado viaja a través de la capa de lutita gris}}$$

$$\text{tiempo} = \frac{15 \text{ m}}{0.266 \text{ m/año}}$$

$$\text{tiempo} = 56.4 \text{ años}$$

3) Tiempo total para que el lixiviado alcance el nivel freático.

Tiempo total = tiempo para atravesar la Capa Uno + tiempo para atravesar la Capa Dos

Tiempo total = 1.25 años + 56.4 años

Tiempo total = 57.6 años.

4.7 Determinación de concentraciones

A continuación se muestran los resultados de los análisis de laboratorio realizados en el laboratorio de la Universidad de la Ciénega, para determinar las concentraciones de los metales pesados en el lixiviado.

Parámetro	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Cu	mg/L	40.53	mg/L	40.53
Zn	mg/L	0.847	mg/L	0.847
Pb	mg/L	0.127	mg/L	0.127
Co	mg/L	84.33	mg/L	84.33
Cr	mg/L	84.33	mg/L	84.33
pH	pH	7.000	pH	7.000

CAPITULO 4

RESULTADOS

4.1 Determinación experimental.

A continuación se presentan los resultados de laboratorio, de las muestras colectadas en los pozos de monitoreo localizados, "aguas arriba" y "aguas abajo" del relleno.

Parámetros	"Aguas Arriba"		"Aguas Abajo"	
Silice	39.69	mg/L	40.53	mg/L
Aluminio	0.487	mg/L	0.647	mg/L
Zinc	0.127 ¹	mg/L	0.127 ¹	mg/L
Sodio	83.77	mg/L	84.33	mg/L
Cloruros	85.25	mg/L	84.33	mg/L
pH	6.975	pH	7.088	pH

Nota: ¹ Menor que el límite práctico de cuantificación.

Tabla 9. Resultados de la determinación analítica de los parámetros seleccionados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Para la determinación de una posible afectación al acuífero, debido a la operación del

4.2 Estimación teórica de la posible afectación al acuífero.

Como resultado de la estimación teórica, al realizar el balance de agua, se encontró que sí hay generación de lixiviado. El volumen anual de lixiviado que se genera es de 325 m^3 .

El tiempo estimado para que el lixiviado alcance el nivel freático del acuífero es de 57.6 años.

Del análisis de los resultados de laboratorio se concluye que el agua subterránea "aguas abajo" no presenta alteraciones significativas en su composición, con respecto a la composición encontrada "aguas arriba".

De igual forma, con los resultados obtenidos por el método teórico se concluye que aun considerando la cantidad de años requerida para que el volumen de lixiviado que se genera por la operación del refino alcance el nivel freático

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

Para la determinación de una posible afectación al acuífero, debido a la operación del relleno, se utilizaron dos métodos distintos entre sí.

El primer método consistió en la determinación experimental (muestreo y análisis de laboratorio) de la calidad del agua subterránea “aguas arriba” y “aguas abajo” del relleno.

El segundo método consistió en la estimación teórica de la generación de lixiviado, su cantidad específica y finalmente, el tiempo en el que dicho volumen de lixiviado podría alcanzar al acuífero.

Del análisis de los resultados de laboratorio se concluye que el agua subterránea “aguas abajo” no presenta alteraciones significativas en su composición, con respecto a la composición encontrada “aguas arriba”.

De igual forma, con los resultados obtenidos por el método teórico se concluye que aún no transcurre la cantidad de años requerida para que el volumen de lixiviado que se genera por la operación del relleno alcance el nivel freático.

CAPITULO 6

BIBLIOGRAFÍA

1. Price, Michael (2007)
Agua Subterránea
México, Limusa.
2. Tchobanoglous, George, Theisen, Hilary, Vigil, Samuel (1993)
Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues
United States of America, Mc Graw Hill.
3. Henry, J. Glynn, Heinke, Gary W. (1999)
Ingeniería Ambiental
México, Prentice Hall.
4. Aparicio Mijares, Francisco Javier (1997)
Fundamentos de hidrología de superficie
México, Limusa, México.

5. Jiménez Cisneros, Blanca E (2001)
La Contaminación Ambiental en México: causas, efectos y tecnología aplicada
México, Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de ingeniería de la UNAM y FEMISCA.
6. Kiely, Gerard (1999) *Ingeniería Ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. España, Mc Graw Hill.
7. Davis, Mackenzie L., Cornwell, David A. (2008)
Introduction to the Environmental Engineering
United States of America, Mc Graw Hill.
8. LaGrega, Michael D., Buckingham, Phillip L. Evans, Jeffrey C. (2001)
Hazardous Waste Management
United States of America, Mc Graw Hill.
9. L. Mijailov (1985)
Hidrogeología
URSS, Mir.

10. Lohman S.W. (1977)

Hidráulica Subterránea

España, Ariel.

11. Custodio, Emilio, Llamas, Manuel Ramón (1976)

Hidrología Subterránea

España, Omega.

12. Vazquez Godina, Elias (2001)

Tesis: cuantificación y efectos de la producción de lixiviados en el relleno sanitario de Salinas Victoria

Nuevo León, Monterrey, México, UANL.



Apéndice A.

Análisis CRETI del lodo



SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA AMBIENTAL

L.Q.I. SERGIO A. CABRERA MIRELES M.C. INGENIERIA AMBIENTAL
MIGUEL ALEMAN 1087 COL. LUIS ECHEVERRIA, TEL. 83-31-35-99 TEL. Y FAX 83-31-59-36 MONTERREY, N.L.
REG. SEDESOL INE-03-19-069

Clave de Muestra R/05110104

Hoja 1 de 7


INFORME DE PRUEBA

A continuación hacemos de su conocimiento los resultados obtenidos de las pruebas practicada a la presente según se describe, así mismo quedamos a su disposición para cualquier duda o información adicional que requiera.

1.0 Datos Generales

Identificación de la Muestra:	Lodos de Planta Tratadora de Agua Residual	Fecha de Muestreo:	2005-11-28
Clave de Muestra:	R/05110104	Fecha de Recepción:	2005-11-28
Tipo de Muestra:	Compuesta	Fecha de Análisis:	2005-11-28 a 2005-12-08
Responsable del Muestreo:	Juan José Silva	Fecha de Reporte:	2005-12-12
Descripción del Análisis:	Caracterización de CRETI de acuerdo a las normas oficiales mexicanas NOM-052-SEMARNAT/93, (establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente) y EPA 1312 (procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción).		

Autorizado por:


L.Q.I. Sergio Cabrera Mireles
Gerente General

- El presente reporte no podrá ser reproducido sin la aprobación del laboratorio.
- El presente ampara a la muestra en el descrita y no al total de la fuente de origen.
- Vigencia de la Acreditación 2008-03-10



ESTE LABORATORIO ESTA ACREDITADO POR LA ENTIDAD MEXICANA DE ACREDITACION, A.C.: AG-112-018/04 PARA AGUAS, FRA-037-014/04 PARA RESIDUOS, FRA-033-010/04 PARA FUENTES FIJAS, FRA-057-020/04 PARA AMBIENTE LABORAL, APROBACION CNA No. CNA-GSCA-424, APROBACION STPS No. LPSTPS-056/04.



SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA AMBIENTAL

L.Q.J. SERGIO A. CABRERA MIRELES M.C. INGENIERIA AMBIENTAL
MIGUEL ALEMAN 1087 COL. LUIS ECHEVERRIA, TEL. 83-31-95-89 TEL. Y FAX 83-31-59-36 MONTERREY, N.L.
REG. SEDESOL INE-03-19-069

Clave de Muestra R/05110104

Hoja 2 de 2

2.0 Datos del Muestreo

2.1 Descripción del Sitio de Muestreo

Área de tolvas para lodos de planta tratadora



ESTE LABORATORIO ESTA ACREDITADO POR LA ENTIDAD MEXICANA DE ACREDITACION, A.C.: AG-112-018/04 PARA AGUAS, FRA-037-014/04 PARA RESIDUOS, FRA-033-010/04 PARA FUENTES FIJAS, FRA-057-020/04 PARA AMBIENTE LABORAL, APROBACION CNA No. CNA-GSCA-424, APROBACION STPS No. LPSTPS-050/04.



SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA AMBIENTAL

L.C.I. SERGIO A. CABRERA MIRELES M.C. INGENIERIA AMBIENTAL
MIGUEL ALEMAN 1087 COL. LUIS ECHEVERRIA, TEL. 83-31-35-99 TEL. Y FAX 83-31-59-36 MONTERREY, N.L.
REG. SEDESOL INE-03-19-069

Clave de Muestra R/05110104

Hoja 3 de 7

2.3 Características Físicas de la Muestra

☐ Sólido ☐ Líquido ☒ Lodos ☐ Gel ☐ Polvo ☐ Tierra ☐ Otros

3.0 Resultados de la Caracterización

3.1 Corrosividad al pH

Parámetro	Resultado	Unidades	Método	Analista
Corrosividad	7,86	pH	EPA 9045C	MGE

3.2 Reactividad

Contacto con soluciones	Reacción 5:1	Reacción 5:3	Reacción 5:5	Analista
Residuo / agua	N.R.	N.R.	N.R.	CM
pH ácido HCl 1.0 N	N.R.	N.R.	N.R.	CM
pH básico NaOH 1.0 N	N.R.	N.R.	N.R.	CM
N.R. No reacciona				

Parámetro	Resultado	Unidades	Método	Analista
Cianuros	< 0,2 ⁽¹²⁾	mg/Kg	EPA SW 846 7.3.3.2	MGE
Sulfuros	< 47,0 ⁽¹²⁾	mg/Kg	EPA SW/846 7.3.4.2	MGE

3.3 Toxicidad

3.3.1 Constituyentes Inorgánicos

Parámetro	Resultado	Unidades	Método	Analista
Arsénico	< 0,0018 ⁽¹²⁾	mg/L PECT	EPA 7062-1994	RZ
Bario	< 1,16 ⁽¹²⁾	mg/L PECT	EPA 7080A-1994	RZ
Cadmio	< 0,085 ⁽¹²⁾	mg/L PECT	EPA 7130-1986	RZ
Cromo Hexavalente	< 0,012 ⁽¹²⁾	mg/L PECT	EPA 7196A-1992	MGE
Níquel	< 1,13 ⁽¹²⁾	mg/L PECT	EPA 7520-1986	RZ
Mercurio	< 0,0022 ⁽¹²⁾	mg/L PECT	EPA 7470A-1984	RZ
Plata	< 0,47 ⁽¹²⁾	mg/L PECT	EPA 7760A-1992	RZ
Plomo	< 0,22 ⁽¹²⁾	mg/L PECT	EPA 7420-1986	RZ
Selenio	< 0,0017 ⁽¹²⁾	mg/L PECT	EPA 7742-1994	RZ

⁽¹²⁾ No detectado menor al límite práctico de cuantificación.

Límite práctico de cuantificación es la concentración del componente que cuando se procesa a través del método, considerando el límite de detección del instrumento y condiciones operativas del laboratorio con estándares acuosos y sin considerar el efecto de matriz produce una señal con una probabilidad del 99% de ser diferente del blanco.

(PECT) Producto de Extracto de Compuestos Tóxicos



ESTE LABORATORIO ESTA ACREDITADO POR LA ENTIDAD MEXICANA DE ACREDITACION, A.C.: AG-112-018/04 PARA AGUAS, FRA-037-014/04 PARA RESIDUOS, FRA-033-010/04 PARA FUENTES FIJAS, FRA-057-020/04 PARA AMBIENTE LABORAL, APROBACION CNA No. CNA-GSCA-424, APROBACION STPS No. LPSTPS-050/04.



SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA AMBIENTAL

L.Q.I. SERGIO A. CABRERA MIRELES M.C. INGENIERIA AMBIENTAL
MIGUEL ALEMAN 1087 COL. LUIS ECHEVERRIA, TEL. 83-31-35-98 TEL. Y FAX 83-31-59-36 MONTERREY, N.L.
REG. SEDESOL INE-03-19-009

Clave de Muestra R/05110104

3.3.2 Constituyentes Orgánicos Volátiles (*)

Hoja 4 de 7

Parámetro	Resultado	Unidades	Método
Benceno	< 0,050	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Clorobenceno	< 0,220	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Cloroformo	< 0,105	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Cloruro de Metileno	< 0,125	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Cloruro de Vinilo	< 0,030	mg/L PECT	USEPA-8260 B
1,2 Diclorobenceno	< 0,110	mg/L PECT	USEPA-8260 B
1,4 Diclorobenceno	< 0,120	mg/L PECT	USEPA-8260 B
1,2 Dicloroetano	< 0,120	mg/L PECT	USEPA-8260 B
1,1 Dicloroetileno	< 0,230	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Isobutanol	< 3,400	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Etilmetilcetona	< 1,200	mg/L PECT	USEPA-8260 B
1,1,1,2 Tetracloroetano	< 0,225	mg/L PECT	USEPA-8260 B
1,1,2,2 Tetracloroetano	< 0,315	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Tetracloruro de Carbono	< 0,110	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Tetracloroetileno	< 0,170	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Tolueno	< 0,170	mg/L PECT	USEPA-8260 B
1,1,1 Tricloroetano	< 0,110	mg/L PECT	USEPA-8260 B
1,1,2 Tricloroetano	< 0,155	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Tricloroetileno	< 0,190	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Acetonitrilo	< 1,050	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Bisulfuro de carbono	< 0,220	mg/L PECT	USEPA-8260 B
Hexacloroetano	< 0,105	mg/L PECT	USEPA-8260 B

(*) Prueba subcontratada

3.3.3 Constituyentes Orgánicos Semivolátiles (*)

Parámetro	Resultado	Unidades	Método
Bis-(2-cloroetil) Eter	< 0,010	mg/L PECT	USEPA-8270 D
Hexaclorobenceno	< 0,010	mg/L PECT	USEPA-8270 D
Fenol	< 0,015	mg/L PECT	USEPA-8270 D
2,4,5 Triclorofenol	< 0,010	mg/L PECT	USEPA-8270 D
2,4,6 Triclorofenol	< 0,010	mg/L PECT	USEPA-8270 D
Piridina	< 0,025	mg/L PECT	USEPA-8270 D
o-Cresol	< 0,010	mg/L PECT	USEPA-8270 D
m-Cresol	< 0,020	mg/L PECT	USEPA-8270 D
p-Cresol	< 0,020	mg/L PECT	USEPA-8270 D
2,4 Dinitrotolueno	< 0,010	mg/L PECT	USEPA-8270 D
Hexacloro-1,3-butadieno	< 0,015	mg/L PECT	USEPA-8270 D
Nitrobenceno	< 0,010	mg/L PECT	USEPA-8270 D
Pentaclorofenol	< 0,100	mg/L PECT	USEPA-8270 D
2,3,4,6 Tetraclorofenol	< 0,025	mg/L PECT	USEPA-8270 D

(*) Prueba subcontratada

(PECT) Producto de Extracto de Compuestos Tóxicos

Fin de Informe



ESTE LABORATORIO ESTA ACREDITADO POR LA ENTIDAD MEXICANA DE ACREDITACION, A.C.: AG-112-018/04 PARA AGUAS, FRA-037-014/04 PARA RESIDUOS, FRA-033-010/04 PARA FUENTES FIJAS, FRA-057-009/04 PARA AMBIENTE LABORAL, APROBACION CNA No. CNA-GSCA-424, APROBACION STPS No. LPSTPS-050/04.



SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA AMBIENTAL

L.Q.L. SERGIO A. CABRERA MIRELES M.C. INGENIERIA AMBIENTAL
MIGUEL ALEMAN 1087 COL. LUIS ECHEVERRIA, TEL. 83-31-35-99 TEL. Y FAX 83-31-59-36 MONTERREY, N.L.
REG. SEDÉSOL INE-03-19-069

Clave de Muestra R/05110104

Anexos Al Informe de Prueba:

Hoja 5 de 7

Comparativo de Resultados contra Límites Máximos Permisibles.

3.1 Corrosividad al pH

Parámetro	Resultado	Límites Máximos Permisibles	Unidades
Corrosividad	7,86	2,0 < pH < 12,5	pH

3.2 Reactividad:

Parámetro	Resultado	Límites Máximos Permisibles	Unidades
Cianuros	< 0,2	No mayor o igual que 250	mg/Kg
Sulfuros	< 47,0	No mayor o igual que 500	ing/Kg

3.3 Toxicidad

3.3.1 Constituyentes Inorgánicos

Parámetro	Resultado	Límites Máximos Permisibles	Unidades
Arsénico	< 0,0018	5,0	mg/L PECT
Bario	< 1,16	100,0	mg/L PECT
Cadmio	< 0,085	1,0	mg/L PECT
Cromo Hexavalente	< 0,012	5,0	mg/L PECT
Níquel	< 1,13	5,0	mg/L PECT
Mercurio	< 0,0022	0,2	mg/L PECT
Plata	< 0,47	5,0	mg/L PECT
Plomo	< 0,22	5,0	mg/L PECT
Selenio	< 0,0017	1,0	mg/L PECT



ESTE LABORATORIO ESTA ACREDITADO POR LA ENTIDAD MEXICANA DE ACREDITACION, A.C.: AG-112-018/04 PARA AGUAS, FRA-037-014/04 PARA RESIDUOS, FRA-033-010/04 PARA FUENTES FIJAS, FRA-057-029/04 PARA AMBIENTE LABORAL, APROBACION CNA No. CNA-GSCA-424, APROBACION STPS No. LPSTPS-050/04.

PRO-10-115-RO



SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA AMBIENTAL

L.Q.I. SERGIO A. CABRERA MIRELES

M.C. INGENIERIA AMBIENTAL

MIGUEL ALEMAN 1087 COL. LUIS ECHEVERRIA, TEL. 83-31-35-99 TEL. Y FAX 83-31-59-36 MONTERREY, N.L.
REG. SEDESOL INE-03-19-069

Clave de Muestra R/05110104

3.3.2 Constituyentes Orgánicos Volátiles

Hoja 6 de 7

Parámetro	Resultado	Límites Máximos Permisibles	Unidades
Benceno	< 0,050	0,5	mg/L PECT
Clorobenceno	< 0,220	100,0	mg/L PECT
Clorofórmio	< 0,105	6,0	mg/L PECT
Cloruro de Metileno	< 0,125	8,6	mg/L PECT
Cloruro de Vinilo	< 0,030	0,2	mg/L PECT
1,2 Diclorobenceno	< 0,110	4,3	mg/L PECT
1,4 Diclorobenceno	< 0,120	7,5	mg/L PECT
1,2 Dicloroetano	< 0,120	0,5	mg/L PECT
1,1 Dicloroetileno	< 0,230	0,7	mg/L PECT
Isobutanol	< 3,400	36,0	mg/L PECT
Etilmetilcetona	< 1,200	200,0	mg/L PECT
1,1,1,2 Tetracloroetano	< 0,225	10,0	mg/L PECT
1,1,2,2 Tetracloroetano	< 0,315	1,3	mg/L PECT
Tetracloruro de Carbono	< 0,110	0,5	mg/L PECT
Tetracloroetileno	< 0,170	0,7	mg/L PECT
Tolueno	< 0,170	14,4	mg/L PECT
1,1,1 Tricloroetano	< 0,110	30,0	mg/L PECT
1,1,2 Tricloroetano	< 0,155	1,2	mg/L PECT
Tricloroetileno	< 0,190	0,5	mg/L PECT
Acetonitrilo	< 1,050	5,0	mg/L PECT
Bisulfuro de carbono	< 0,220	14,4	mg/L PECT
Hexacloroetano	< 0,105	3,0	mg/L PECT

3.3.3 Constituyentes Orgánicos Semivolátiles

Parámetro	Resultado	Límites Máximos Permisibles	Unidades
Bis-(2-cloroetil)Eter	< 0,010	0,05	mg/L PECT
Hexaclorobenceno	< 0,010	0,13	mg/L PECT
Fenol	< 0,015	14,4	mg/L PECT
2,4,5 Triclorofenol	< 0,010	400,0	mg/L PECT
2,4,6 Triclorofenol	< 0,010	2,0	mg/L PECT
Piridina	< 0,025	5,0	mg/L PECT
o-Cresol	< 0,010	200,0	mg/L PECT
m-Cresol	< 0,020	200,0	mg/L PECT
p-Cresol	< 0,020	200,0	mg/L PECT
2,4 Dinitrotolueno	< 0,010	0,13	mg/L PECT
Hexacloro-1,3-butadieno	< 0,015	0,5	mg/L PECT
Nitrobenceno	< 0,010	2,0	mg/L PECT
Pentaclorofenol	< 0,100	100,0	mg/L PECT
2,3,4,6 Tetraclorofenol	< 0,025	1,5	mg/L PECT



ESTE LABORATORIO ESTA ACREDITADO POR LA ENTIDAD MEXICANA DE ACREDITACION, A.C.: AG-112-018/04 PARA AGUAS, FRA-037-014/04 PARA RESIDUOS, FRA-033-010/04 PARA FUENTES FIJAS, FRA-057-020/04 PARA AMBIENTE LABORAL, APROBACION CNA No. CNA-GSCA-424, APROBACION STPS No. LPSTPS-050/04, FPO 3-10-13-R0

Resumen del Método de Muestreo de pozos U.S. EPA # 1020

El enfoque principal de este método de muestreo es la colección de muestras de agua de la zona saturada del subsuelo. Se debe asegurar que la muestra sea representativa de la zona en particular que está siendo muestreada. Este procedimiento está diseñado para ser utilizado en conjunto con el análisis de los tipos más comunes de contaminantes de aguas subterráneas.

Apéndice B.

Método de muestreo de pozos

Previo a muestrear un pozo de monitoreo, el pozo debe estar bien purgado. Esto debe ser hecho con una variedad de instrumentos. Los instrumentos más comunes son (en orden de preferencia): bomba sumergible, bomba manual y pallo.

Tradicionalmente era requerido que un mínimo de tres volúmenes del pozo fueran purgados; sin embargo, las investigaciones han mostrado que incrementos de purgado tales como el pH, conductividad, nitrato, nitrito, amonio, etc.

Resumen del Método de Muestro de pozos U.S EPA # 1220

El enfoque principal de este método de muestreo es la colección de muestras de agua de la zona saturada del subsuelo. Se debe asegurar que la muestra sea representativa de la zona en particular que este siendo muestreada. Este procedimiento esta diseñado para ser utilizado en conjunto con el análisis de los tipos más comunes de contaminantes de aguas subterráneas.

El monitoreo de pozos para definir la pluma contaminante requiere muestras representativas de un pequeño volumen del acuífero. Estas circunstancias requieren que el pozo sea bombeado lo suficiente para remover el agua estancada, pero cuidando de no inducir flujo de otras áreas.

Previo a muestrear un pozo de monitoreo, el pozo debe estar bien purgado. Esto debe ser hecho con una variedad de instrumentos. Los instrumentos más comunes son (en orden de importancia): bomba sumergible, bomba inercial y bailer.

Tradicionalmente era requerido que un mínimo de tres volúmenes del pozo fuesen purgados; sin embargo, las investigaciones han mostrado que monitoreando parámetros tales como el pH, conductividad, oxígeno disuelto, potencial oxido-

reducción, temperatura, y turbidez durante el proceso de purgado es posible determinar cuando el agua estática ha sido purgada.

Algunas veces, la estabilidad es alcanzada antes que los tres volúmenes hayan sido purgados reduciendo con esto el volumen de agua a purgar. Si, por otra parte, después que los tres volúmenes han sido removidos, los parámetros químicos no han sido estabilizados acorde a los criterios antes mencionados, adicional volumen debe ser purgado. Si los parámetros no han sido estabilizados dentro de los cinco volúmenes, es a decisión del líder del proyecto si colecta las muestras o continúa purgando el pozo. Se debe de llevar un registro del volumen del agua purgado del pozo así como también del criterio que se haya seguido para determinar cuando se había alcanzado el volumen de purga adecuado.

Todos los equipos deben ser descontaminados previo a su uso en otro pozo. Una vez que el proceso de purga ha terminado y los contenedores o depósitos para las muestras han sido preparados, se debe de proceder a la toma de muestras. El muestreo debe de ser realizado con cualquiera de los instrumentos o dispositivos arriba mencionados y no necesariamente debe de ser el mismo que se utilizo en el proceso de purgado. Los bailers pueden ser usados para colectar las muestras después de que el proceso de purga se haya completado con un bomba. Sin embargo, no se recomienda utilizar bailers para realizar el proceso de purga debido a que este dispositivo es muy probable que genere o provoque turbulencia en el sistema de agua subterránea. Se debe tener cuidado al seleccionar el dispositivo de muestreo, debido a

que (algunos tipos de materiales y la presión) podrían afectar la integridad de la muestra.

El equipo de muestreo también debe de ser descontaminado. El muestreo debe de ser progresivo, iniciando en el pozo menos contaminado y finalizando en el pozo con mayor nivel de contaminación. Lo anterior, en caso de que dicha información este disponible.

Apéndice C.

Resultados del muestreo de pozos:

- a) "aguas arriba".
- b) "aguas abajo".

INFORME DE PRUEBA

Atención: Ing. Adán Arce Pineda

A continuación se presenta el resultado de los análisis realizados en las muestras de agua tomadas en el pozo de agua de la zona de estudio, con el fin de determinar la calidad del agua y la presencia de contaminantes.

Identificación de la muestra:	Pozo Agua Arriba	Fecha de Muestreo:	2024-01-20
Código de Muestra:	AG-2024-01-20-1	Fecha de Reporte:	2024-01-25
Localidad de Muestreo:	San José	Intervalo:	2024-01-20 a 2024-01-25
Responsable del Muestreo:	Contratista de Servicio	Fecha del Reporte:	2024-01-25

Apéndice C.

Resultados del muestreo de pozos:

Atención: Ing.

- “aguas arriba”.
- “aguas abajo”.

Ing. Diego Carlos Pineda
Gerente General

- El agua de la muestra no presenta contaminación por metales pesados.
- El agua de la muestra no presenta contaminación por nitratos.
- El agua de la muestra no presenta contaminación por pesticidas.
- El agua de la muestra no presenta contaminación por bacterias.
- El agua de la muestra no presenta contaminación por virus.

a) Resultado "aguas arriba".



Clave de Muestra AG/08070161

SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA AMBIENTAL

INFORME DE PRUEBA

Hoja- 1 de 3

Atención: Ing. Adan Adrian Plascencia

A continuación hacemos de su conocimiento los resultados obtenidos de las pruebas practicada a la presente según se describe, así mismo quedamos a su disposición para cualquier duda o información adicional que requiera.

Identificación de la Muestra:	Pozo Agua Arriba	Fecha de Muestreo:	2008-07-30
Clave de Muestra:	AG/08070161	Fecha de Recepción:	2008-07-30
Tipo de Muestra:	Simple	Fecha de Análisis:	2008-07-30 á 2008-08-08
Responsable del Muestreo:	Solicitante de Servicio	Fecha de Reporte:	2008-08-11

Descripción del Análisis: Análisis de agua de pozo de acuerdo a parámetros establecidos por el cliente.

Autorizado por:

LQI. Sergio Cabrera Mireles
Gerente General

- El presente reporte no podrá ser reproducido sin la aprobación del laboratorio
- El presente ampara a la muestra en el descrita y no al total de la fuente de origen.
- Vigencia de la Acreditación 2008-08-28
- Acreditación No: AG-112-018/04
- Aprobación No: CNA-GSCA-424

FPO-5.10-01-02-R0



SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA AMBIENTAL

L.Q.J. SERGIO A. CABRERA MIRELES M.C. INGENIERIA AMBIENTAL
MIGUEL ALEMÁN 1087 COL. LUIS ECHEVERRÍA, TEL Y FAX. 8331 35 99 Y 8331 59 36, MONTERREY, N.L.
www.sicamx.com REG. SEDESOL INE-03-19-069

Clave de Muestra AG/08070161

Hoja- 2 de 3

Resultados de la Caracterización

1.-Fisicoquímico

Parámetro	Resultado	Unidades	Método	Analista
Cloruros	85,25	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001	LIB
pH	6,975	pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	LPR
Sílice	39,69	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	DASM

2.- Metales

Parámetro	Resultado	Unidades	Método	Analista
Aluminio	0,487	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001 (Espectrofotometría de Absorción Atómica)	EVD
Sodio	83,77	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001 (Espectrofotometría de Absorción Atómica)	EVD
Zinc	< 0,127 ⁽⁹⁾	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001 (Espectrofotometría de Absorción Atómica)	EVD

⁽⁹⁾ No detectado menor al límite práctico de cuantificación.

Límite práctico de cuantificación es la concentración del componente que cuando se procesa a través del método, considerando el límite de detección del instrumento y condiciones operativas del laboratorio con estándares acuosos y sin considerar el efecto de matriz produce una señal con una probabilidad del 99% de ser diferente del blanco

Fin de Informe

b) Resultado "aguas abajo".

Clave de Muestra AG/08070160

Hoja- 1 de 3

INFORME DE PRUEBA

Atención: Ing. Adan Adrian Plascencia

A continuación hacemos de su conocimiento los resultados obtenidos de las pruebas practicada a la presente según se describe, así mismo quedamos a su disposición para cualquier duda o información adicional que requiera.

Identificación de la Muestra:	Pozo Agua Abajo	Fecha de Muestreo:	2008-07-30
Clave de Muestra:	AG/08070160	Fecha de Recepción:	2008-07-30
Tipo de Muestra:	Simple	Fecha de Análisis:	2008-07-30 a 2008-08-08
Responsable del Muestreo:	Solicitante de Servicio	Fecha de Reporte:	2008-08-11

Descripción del Análisis: Análisis de agua de pozo de acuerdo a parámetros establecidos por el cliente.

Autorizado por:

LQI. Sergio Cabrera Mireles
Gerente General

- El presente reporte no podrá ser reproducido sin la aprobación del laboratorio
- El presente ampara a la muestra en el descrita y no al total de la fuente de origen.
- Vigencia de la Acreditación 2008-08-28
- Acreditación No: AG-112-018/04
- Aprobación No: CNA-GSCA-424

FPO-5.10-01-02-R0



SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA AMBIENTAL

L.Q.I. SERGIO A. CABRERA MIRELES M.C. INGENIERIA AMBIENTAL
MIGUEL ALEMÁN 1087 COL. LUIS ECHEVERRÍA, TEL Y FAX. 8331 35 99 Y 8331 59 36, MONTERREY, N.L.
www.sicamx.com REG. SEDESOL INE-03-19-069

Clave de Muestra AG/08070160

Hoja- 2 de 3

Resultados de la Caracterización

1.-Físicoquímico

Parámetro	Resultado	Unidades	Método	Analista
Cloruros	84,33	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001	LIB
pH	7,088	pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	LPR
Sílice	40,53	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	DASM

2.- Metales

Parámetro	Resultado	Unidades	Método	Analista
Aluminio	0,647	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001 (Espectrofotometría de Absorción Atómica)	EVD
Sodio	84,173	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001 (Espectrofotometría de Absorción Atómica)	EVD
Zinc	< 0,127 ^(a)	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001 (Espectrofotometría de Absorción Atómica)	EVD

^(a) No detectado menor al límite práctico de cuantificación.

Límite práctico de cuantificación es la concentración del componente que cuando se procesa a través del método, considerando el límite de detección del instrumento y condiciones operativas del laboratorio con estándares acuosos y sin considerar el efecto de matriz produce una señal con una probabilidad del 99% de ser diferente del blanco

Fin de Informe

FPO-5.10-01-02-R0

El método de Penman es el más preciso de la evaporación. En este estudio, en particular, se utilizó el método de Penman.

En 1948, Penman desarrolló una teoría basada en el balance de energía para la estimación de la evaporación.

Para facilitar la aplicación de la ecuación de Penman, Wilson propuso el nomograma que lleva su nombre.

Para usar el nomograma de Wilson, los siguientes datos, algunos que deben ser del sitio de interés:

Apéndice D.

Estimación de la evaporación en el sitio del relleno.

- Temperatura del aire, t ($^{\circ}\text{C}$).
- Alfabetización de humedad, h (%).
- Radiación solar, R_s ($\text{g cal/cm}^2 \text{ día}$).
- Humedad relativa, h (%).
- Velocidad del viento, V_s (km/h).

Existen varias fórmulas para el cálculo de la evaporación. En este estudio, en particular se utilizará el método de Penman.

En 1948, Penman desarrolló una teoría basada en el balance de energía para el cálculo de la evaporación.

Para facilitar la aplicación de la ecuación de Penman, Wilson propone el nomograma que lleva su nombre.

Para usar el nomograma de Wilson, se requieren los siguientes datos, mismos que deben ser del sitio de interés.

- a) Temperatura del aire, t (°C).
- b) Relación de nubosidad, n/D .
- c) Radiación solar, R_A (g cal/cm² día).
- d) Humedad relativa, h (%).
- e) Velocidad del viento, V_w (km/h).

Donde:

n = número de horas reales de sol en el mes en cuestión.

D = número de horas posibles de sol; esto es, el que se tendría si no hubiera nubes en todo el día.

El valor de n puede estimarse a partir de información meteorológica del sitio y D según la latitud y la época del año, con la tabla 10.

R_A , puede calcularse también en función de la latitud y la época del año, en la tabla 11.

La temperatura del viento, la humedad relativa, la velocidad del viento (medida a 2 m de la superficie) y el número de horas reales de sol, deben ser medidos en el lugar de interés.

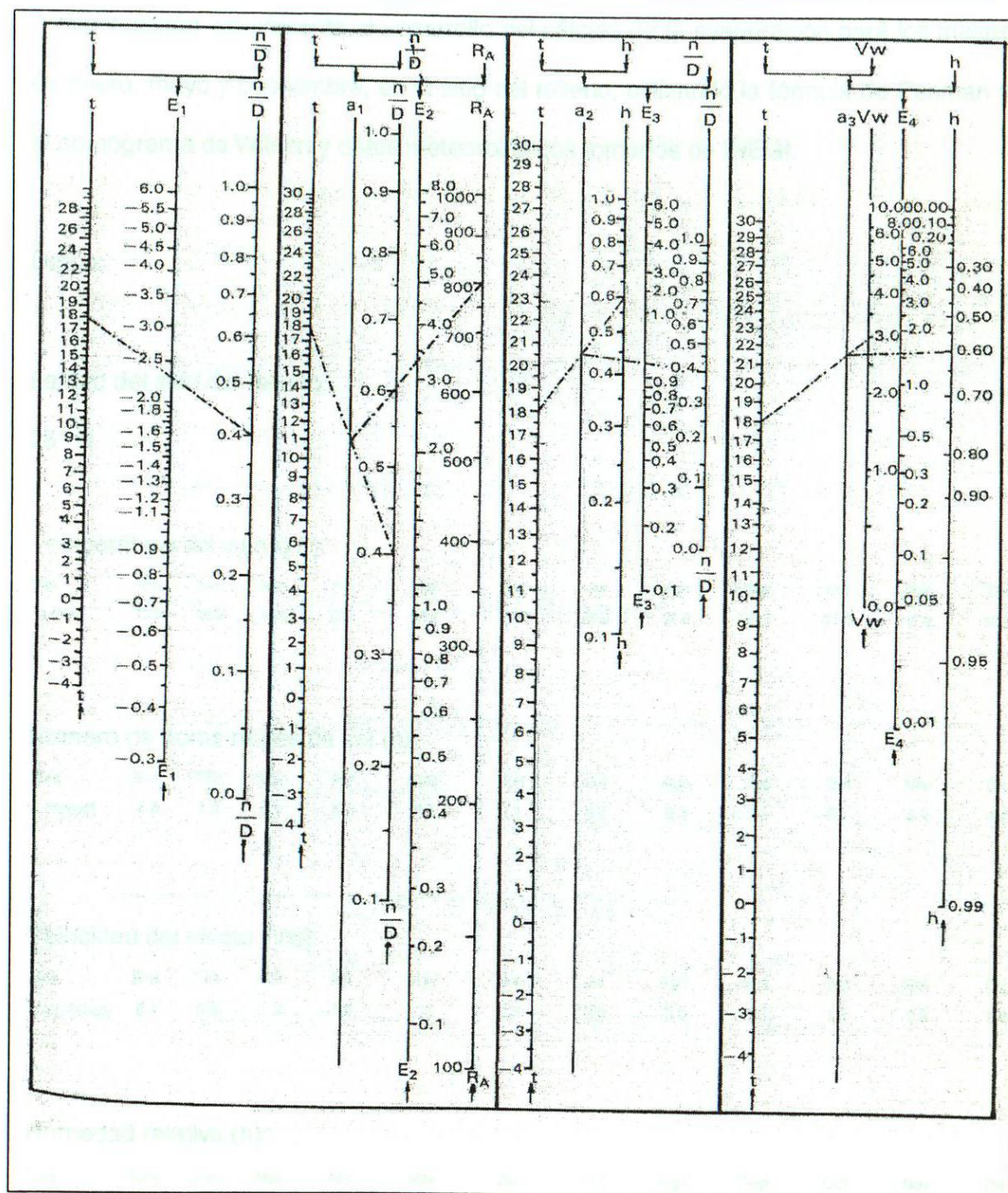
Tabla 10. Valores de n en horas.

Latitud N o S	N Jul 17	Ago 19	Sep 17	Oct 18	Nov 17	Dic 16	Ene 13	Feb 11	Mar 13	Abr 12	May 13	Jun 14
	S Ene 15	Feb 15	Mar 15	Abr 15	May 15	Jun 15	Jul 15	Ago 15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dic 15
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
10	12.6	12.4	12.2	11.9	11.7	11.5	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7
20	13.2	12.7	12.2	11.7	11.2	10.9	11.0	11.4	12.0	12.6	13.1	13.3
30	13.9	13.1	12.3	11.4	10.6	10.2	10.4	11.0	11.9	12.8	13.6	14.1
40	14.6	13.6	12.4	11.1	9.9	9.3	9.6	10.5	11.8	13.2	14.3	15.0
50	15.9	14.2	12.5	10.6	9.0	8.1	8.5	9.9	11.7	13.6	15.3	16.3
60	18.0	15.3	12.7	10.0	7.4	5.9	6.6	8.7	11.5	14.3	17.0	18.7
70	24.0	17.6	13.2	8.8	3.6	0	0	6.7	11.3	15.2	21.3	24.0
80	24.0	24.0	14.6	4.2	0	0	0	0	11.2	20.2	24.0	24.0
90	24.0	24.0	24.0	0	0	0	0	0	0	24.0	24.0	24.0

Tabla 10. Valores de D en h.

Latitud	Mar 21	Abr 13	May 6	May 29	Jun 22	Jul 15	Ago 8	Ago 31	Sep 23	Oct 16	Nov 8	Nov 30	Dic 22	Ene 13	Feb 4	Feb 26
N 90		436	795	1029	1109	1024	788	431								
80	100	436	783	1014	1092	1009	777	431	158	7					25	135
70	310	541	771	967	1012	962	764	535	312	133	25	74	50	75	150	284
60	460	654	833	962	1008	957	825	648	455	281	150	210	181	211	298	432
50	592	754	893	987	1019	983	885	747	585	426	295	358	326	361	447	570
40	707	831	937	1001	1021	996	928	822	697	561	442	507	480	509	585	690
30	798	891	957	996	1004	989	949	882	788	683	581	646	623	649	712	792
20	866	921	951	963	963	958	943	911	856	788	706	770	755	775	819	870
10	908	924	920	907	899	903	913	914	897	860	813	877	868	881	904	923
0	922	899	862	828	814	824	855	889	912	913	898	959	961	964	964	949
S 10	908	849	783	728	708	725	776	838	897	937	954	1017	1029	1023	997	946
20	866	773	680	611	584	608	674	763	856	934	987	1051	1072	1056	1002	915
30	798	674	559	479	449	477	554	665	788	903	993	1058	1091	1063	982	853
40	707	554	425	339	306	338	421	549	697	844	972	1044	1088	1048	936	775
50	592	420	284	199	170	198	282	416	585	765	928	1113	1077	1022	872	672
60	460	277	144	70	48	70	143	274	455	663	865	1023	1113	1028	809	555
70	316	131	24				24	130	312	518	801	1072	1166	1077	820	447
80	166	7						7	158	442	814	1088	1183	1094	833	447
90										442	825	1088	1183	1094	833	447

Tabla 11. Valores de R_A (cal/cm² día).



Nomograma 1. Nomograma de Wilson.

A continuación, se presenta el desarrollo del cálculo de la evaporación para los meses de enero, mayo y septiembre, en el sitio del relleno, utilizando la fórmula de Penman y el nomograma de Wilson y datos meteorológicos tomados de INEGI.

Datos:

Latitud del sitio del relleno:

25° N.

Temperatura del viento (t):

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ta (°C)	13.9	16.6	19.5	22.7	26.2	27.5	28.0	27.8	25.0	21.8	17.8	16.2

Numero de horas reales de sol (n):

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
n (horas)	4.6	4.9	6.1	6.2	6.5	7.1	8.0	8.2	6.5	5.7	5.4	4.6

Velocidad del viento (Vw):

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Vw (m/seg)	0.4	0.9	1.6	2.0	2.0	2.3	2.0	2.0	1.3	1.2	0.8	0.6

Humedad relativa (h):

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
h (%)	56.9	63.6	65.9	61.5	64.9	63.0	67.7	62.7	73.6	77.1	73.5	76.0

Cálculo de la evaporación para el mes de enero

a) Determinación de número de horas de sol posibles por día (D) (Tabla 10)

Enero y Latitud 20° N: D 20° = 11.0

Enero y Latitud 30° N: D 30° = 10.4

Asumiendo una relación lineal:

Enero y Latitud 25° N: D 25° = 10.7

b) Determinación de la relación de nubosidad (n/D)

Número de horas reales de sol = 4.6

Número de horas posibles de sol = 10.7

Relación de nubosidad = 0.43

c) Determinación de la radiación solar (Rc) (Tabla 11)

Enero y Latitud 20° N: Rc 20° = 649

Enero y Latitud 30° N: Rc 30° = 509

Asumiendo una relación lineal:

Enero y Latitud 25° N: Rc 25° = 579

d) Determinación de las evaporaciones (E1, E2, E3 y E4) (Nomograma de Wilson)

d.1 Determinación de E1

Temperatura =	13.9
Relación de nubosidad =	0.43
E1 =	-2.1

d.2 Determinación de E2

Temperatura =	13.9
Relación de nubosidad =	0.43
Radiación solar =	579
E2 =	2.3

d.3 Determinación de E3

Temperatura =	13.9
Relación de nubosidad =	0.43
Humedad relativa	56.9
E3 =	0.86

d.4 Determinación de E4

Temperatura = 13.9

a) Determinación de la velocidad del viento (V) en m/s por día (D) (Tabla 4.1)

Humedad relativa = 56.9 = 13.1

E4 = 0.50 = 13.6

e) Determinación de la Evaporación diaria ($E_{\text{día}}$)

$E_{\text{día}} = 1.56$ mm/día

f) Determinación de la evaporación mensual (E)

$E_{\text{Enero}} = 46.8$ mm/mes

Numero de horas-mes de la zona = 46

Numero de horas promedio de la zona = 13.35

Porcentaje de humedad = 0.49

g) Determinación de la radiación solar (H_0) (Tabla 4.2)

Latitud 20° N $H_0 20^\circ = 467$

Latitud 30° N $H_0 30^\circ = 517$

Asumiendo una latitud de 25° N

Latitud 25° N $H_0 25^\circ = 517$

Cálculo de la evaporación para el mes de mayo

a) Determinación de Número de horas de sol posibles por día (D) (Tabla 4.1)

Mayo y Latitud 20° N: $D 20^\circ = 13.1$

Mayo y Latitud 30° N: $D 30^\circ = 13.6$

Asumiendo una relación lineal:

Mayo y Latitud 25° N $D 25^\circ = 13.35$

b) Determinación de la relación de nubosidad (n/D)

Número de horas reales de sol = 6.5

Número de horas posibles de sol = 13.35

Relación de nubosidad = 0.49

c) Determinación de la radiación solar (Rc) (Tabla 4.2)

Mayo y Latitud 20 N: $Rc 20^\circ = 957$

Mayo y Latitud 30 N: $Rc 30^\circ = 977$

Asumiendo una relación lineal:

Mayo y Latitud 25° N: $Rc 25^\circ = 967$

d) Determinación de las evaporaciones (E1, E2, E3 y E4) (Nomograma de Wilson)

d.1 Determinación de E1

Temperatura = 26.2

Relación de nubosidad = 0.49

E1 = -3.5

d.2 Determinación de E2

Temperatura = 26.2

Relación de nubosidad = 0.49

Radiación solar = 967

E2 = 5.1

d.3 Determinación de E3

Temperatura = 26.2

Relación de nubosidad = 0.49

Humedad relativa 64.9

E3 = 1.5

d.4 Determinación de E4

Temperatura = 26.2

Velocidad del viento = 2.0

Humedad relativa = 64.9

E4 = 1.3

e) Determinación de la Evaporación ($E_{\text{día}}$)

$E_{\text{día}} = 4.4$ mm/día

f) Determinación de la evaporación mensual (E)

$E_{\text{Mayo}} = 132$ mm/mes

Cálculo de la evaporación para el mes de septiembre

a) Determinación de Numero de horas de sol posibles por día (D) (Tabla 4.1)

Septiembre y Latitud 20° N: $D_{20^\circ} = 12.2$

Septiembre y Latitud 30° N: $D_{30^\circ} = 12.3$

Asumiendo una relación lineal:

Septiembre y Latitud 25° N: $D_{25^\circ} = 12.25$

b) Determinación de la relación de nubosidad (n/D)

Número de horas reales de sol = 6.5

Número de horas posibles de sol = 12.25

Relación de nubosidad = 0.53

c) Determinación de la radiación solar (Rc) (Tabla 4.2)

Septiembre y Latitud 20° N: $Rc_{20^\circ} = 856$

Septiembre y Latitud 30° N: $Rc_{30^\circ} = 788$

Asumiendo una relación lineal:

Septiembre y Latitud 25° N: $Rc_{25^\circ} = 821$

d) Determinación de las evaporaciones (E1, E2, E3 y E4) (Nomograma de Wilson)

d.1 Determinación de E1

Temperatura = 25.0

Relación de nubosidad = 0.53

E1 = -3.4

d.2 Determinación de E2

Temperatura = 25.0

Relación de nubosidad = 0.53

Radiación solar = 821

E2 = 4.5

d.3 Determinación de E3

Temperatura = 25.0

Relación de nubosidad = 0.53

Humedad relativa 73.6

E3 = 1.7

d.4 Determinación de E4

Temperatura = 25.0

Velocidad del viento = 1.3

Humedad relativa 73.6

E4 = 0.54

e) Determinación de la Evaporación ($E_{\text{día}}$)

$E_{\text{día}} = 3.34 \text{ mm/día}$

f) Determinación de la evaporación mensual (E)

$E_{\text{Septiembre}} = 100.2 \text{ mm/mes}$

A continuación, se presenta un resumen de los valores de evaporación para cada uno de los meses del año:

Mes	Horas reales de sol por día (n)	Horas posibles de sol por día (D)	Relación de nubosidad (n/D)	Radiación solar (Rc)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/seg)	Nomograma de Wilson				Evaporación	
								E1	E2	E3	E4	día (mm)	mes (mm)
Enero	4.6	10.7	0.43	575	13.9	56.9	0.4	-2.1	2.3	0.86	0.50	1.6	46.8
Febrero	4.9	11.2	0.44	690	16.6	63.6	0.9	-2.3	2.9	0.92	0.54	2.1	61.8
Marzo	6.1	11.9	0.51	830	19.5	65.9	1.6	-2.8	4.1	0.96	0.80	3.1	91.8
Abril	6.2	12.7	0.49	906	22.7	61.5	2.0	-3.0	4.5	0.97	1.30	3.8	113.1
Mayo	6.5	13.4	0.49	967	26.2	64.9	2.0	-3.5	5.1	1.50	1.30	4.4	132.0
Junio	7.1	13.7	0.52	983	27.5	63.0	2.3	-3.5	5.4	2.00	1.40	5.3	159.0
Julio	8.0	13.6	0.59	974	28.0	67.7	2.0	-3.9	5.6	2.90	1.20	5.8	174.0
Agosto	8.2	12.9	0.64	922	27.8	62.7	2.0	-4.0	5.5	2.60	1.40	5.5	165.0
Septiembre	6.5	12.3	0.53	821	25.0	73.6	1.3	-3.4	4.5	1.70	0.54	3.3	100.2
Octubre	5.7	11.6	0.49	735	21.8	77.1	1.2	-2.9	3.6	0.99	0.50	2.2	65.7
Noviembre	5.4	10.9	0.50	610	17.8	73.5	0.8	-2.2	2.8	0.96	0.40	2.0	58.8
Diciembre	4.6	10.6	0.43	550	16.2	76.0	0.6	-2.0	2.3	0.93	0.35	1.6	47.4

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Adán Adrián Plascencia Inzunza

Candidato para el grado de

Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental

Tesis:

EFFECTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA CIRCUNDANTE A UN RELENO SIN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN ARTIFICIAL, PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO PROVENIENTE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL.

Campo de Estudio:

Ciencias del Ambiente.

Biografía:

Datos personales: Nacido en Guasave, Sinaloa, el 5 de Marzo de 1971, hijo de Rosario Plascencia Bojorquez y Julia Inzunza Silva.

Educación:

Egresado de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Sinaloa en 1994.

Experiencia profesional:

Responsable del Departamento de Seguridad Industrial y Control Ambiental en empresas privadas de diversos giros industriales desde 1994 a la fecha.

Correo electrónico: aplascencia1601@hotmail.com

